文部省検定済教科書 | 7 実教 | 工業 066

電気技術ⅡB

実教出版

昭和57年３月31日　文部省検定済　高等学校工業科用

電気技術ⅡB

宮 入 庄 太
山口昌一郎

実教出版株式会社

監修

東京工業大学名誉教授 東京電機大学教授 工学博士 宮入庄太

東京工業大学名誉教授 東京工科大学教授 工学博士 山口昌一郎

編修

元東京都立本所工業高等学校長 緒方興助

東京都立小金井工業高等学校教諭 赤沼岩男

元東京都立荒川工業高等学校教諭 石井孝司

東京工業大学付属工業高等学校教諭 井上正也

東京都立町田工業高等学校教諭 熊谷文宏

東京工業大学教授 工学博士 清水康敬

協力

元東京都立葛西工業高等学校教諭 市川武

東京都立蔵前工業高等学校教諭 伊藤恭史

東京都立八王子工業高等学校教諭 高野雄三郎

東京都立練馬工業高等学校教諭 多田正美

元東京都立蔵前工業高等学校教諭 寺井正一

愛知県立名南工業高等学校教諭 平野義之

元兵庫県立兵庫工業高等学校長 渡辺次郎

目 次

第6章 電 子 計 測

1. 高周波基本計測 …… 2
1. 表皮効果と分布容量 …… 2
2. 高周波電流の測定 …… 5
3. 高周波電圧の測定 …… 8
4. 高周波電力の測定 …… 12
5. 高周波インピーダンスの測定 …… 16
6. 高い周波数の測定 …… 21
7. トリガ式オシロスコープ …… 26
問 題 …… 30

2. 応 用 計 測 …… 31
1. センサの利用 …… 31
2. 各種のセンサ …… 32
3. 遠 隔 測 定 …… 41
問 題 …… 44

第7章　照　明

1. 照明の基礎 ……………………………… **46**

1. 光のエネルギー ………………………… 46
2. 点光源と照度 ………………………… 50
3. 面光源と輝度 ………………………… 54
問　題 ………………………… 56

2. 電　灯 ……………………………… **57**

1. 温度放射 ………………………… 57
2. 電　球 ………………………… 59
3. 測　光 ………………………… 62
問　題 ………………………… 66

3. 放電灯 ……………………………… **67**

1. けい光灯 ………………………… 67
2. 水銀ランプ ………………………… 73
3. 各種のランプ ………………………… 76
問　題 ………………………… 80

4. 照明設計 ……………………………… **81**

1. 照明器具とその利用 ………………………… 81
2. 屋内全般照明の設計 ………………………… 86
3. 道路の照明 ………………………… 90
問　題 ………………………… 92

第8章　電　　　熱

1.　電 熱 の 基 礎 ……………………………………………………94
1.　電熱の発生と伝達 ……………………………94
2.　電 熱 用 材 料 ……………………………………97
3.　温 度 の 測 定 …………………………………101
問　　　題 ……………………………………104

2.　各種の電熱装置 ……………………………………………………105
1.　電　　気　　炉 ……………………………105
2.　誘　導　加　熱 ……………………………109
3.　電　気　乾　燥 ……………………………113
問　　　題 ……………………………………116

第9章　電　気　応　用

1.　電　気　鉄　道 ……………………………………………………118
1.　電気鉄道の特徴と方式 ……………………118
2.　鉄　道　線　路 ……………………………119
3.　電　　気　　車 ……………………………124
4.　信 号 ・ 保 安 ……………………………131
5.　特　殊　鉄　道 ……………………………138
問　　　題 ……………………………………144

2. 電 気 化 学 …………………………………………………… 145
1. 電　　池 ………………………………… 145
2. 電気めっき ………………………………… 150
3. 電解化学工業 ………………………………… 152
4. 電熱化学工業 ………………………………… 156
問　　題 ………………………………… 160

3. 各種の応用 …………………………………………………… 161
1. 超　音　波 ………………………………… 161
2. 電気集じん ………………………………… 165
3. 電 気 溶 接 ………………………………… 168
問　　題 ………………………………… 171

問 題 解 答 …………………………………………………… 172
索　　　引 …………………………………………………… 174

「電気技術 IIA」目　次

第1章　電子と電子管
第2章　半導体素子
第3章　電 子 回 路
第4章　電 気 通 信
第5章　テレビジョン

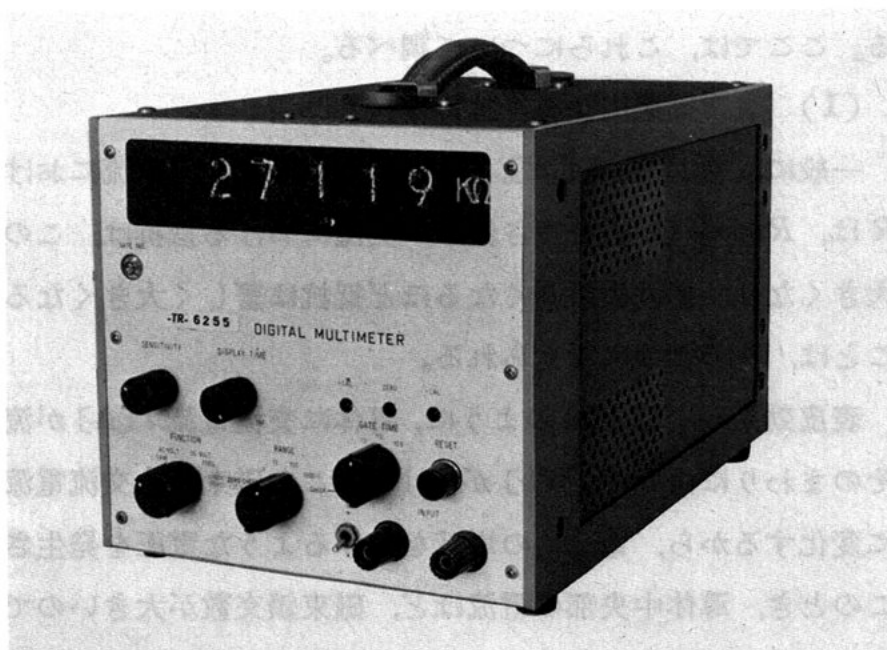
「電気技術 IIC」目　次

第10章　電子計算機
第11章　自 動 制 御

第6章 電子計測

これまでに，直流や商用周波数の交流では，電圧・電流・電力および周波数などの測定について，いろいろな方法を学んできた。このような測定技術を工夫して，周波数の高い領域でもこれらの量を測定できるようにしたものが，高周波計測であり，電気以外のいろいろな量を測定できるようにしたものが，応用計測である。

このような計測は，ふつう，トランジスタなどの電子素子を利用するので，電子計測とよばれる。この章では，電子計測の基礎として必要な事項を，これまでに学んだことと関連づけながら調べる。

ディジタル計器

高周波基本計測

この節のねらい　高周波における電流・電圧・電力などの基本量の測定は，商用周波数における測定と本質的には違わず，いずれも直流回路の諸量の測定を基本としている。

しかし，高周波回路では，表皮効果や分布容量が強く働くので，測定器は，これらに注意して作られており，測定にさいしては，それらを考えて行う必要がある。ここでは，表皮効果による実効抵抗，分布容量などの測定について考え，次に，電流・電圧・電力などの基本量の測定について調べる。

1. 表皮効果と分布容量

直流回路や低周波回路ではあまり目立たないが，高周波回路では大きな問題となるものに，表皮効果・分布容量とよばれるものがある。ここでは，これらについて調べる。

（1） 表皮効果による抵抗の増大

一般に，断面積 A〔m²〕，長さ l〔m〕の導体の直流における抵抗 R は，$R=\rho\dfrac{l}{A}$〔Ω〕で表される。交流における抵抗は，この値より大きくなり，周波数が高くなるほど抵抗は著しく大きくなる。このことは，次のように考えられる。

表皮効果　図1(a)のように，導体に交流電流 i〔A〕が流れると，そのまわりに磁束 Φ〔Wb〕が生ずる。この磁束は，交流電流とともに変化するから，電流 i の増減を妨げるような電圧を発生させる。このとき，導体中央部の電流ほど，磁束鎖交数が大きいので，この発生電圧は，導体の中央部ほど大きい。したがって，電流は導体の

(a)

(b) 周波数の違いによる電流密度の分布

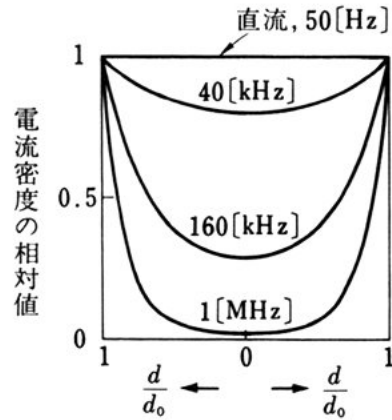
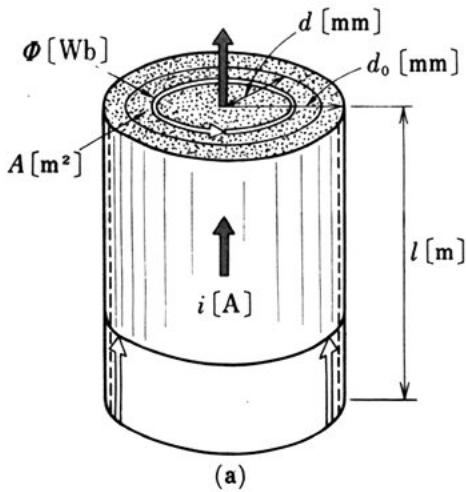



図 1 表皮効果の説明

表皮の部分に多く流れようとし，中央部分には流れない。このような効果を **表皮効果** という。

図(b)は，直径 0.9〔mm〕の銅線の各周波数における電流密度を示す。この図からわかるように，直流および周波数が 50〔Hz〕程度の交流では，ほとんど一様に流れるが，周波数が 1〔MHz〕以上になると，中央部の電流密度はほとんど 0 となる。

抵抗の増大　表皮効果があると，実効的に導体の断面積が小さくなったことになり，その結果，導体の示す抵抗が大きくなる。この抵抗は，交流の **実効抵抗** とよばれる。

例えば，長さ 1〔m〕の銅線の直流抵抗は 0.027〔Ω〕であり，周波数が 50〔Hz〕でも，抵抗はほとんど変わらない。しかし，40〔kHz〕における実効抵抗は直流抵抗の約 1.07 倍となり，160〔kHz〕では約 1.6 倍，1〔MHz〕では約 3.7 倍，さらに 50〔MHz〕では約 24 倍となる。このように，実効抵抗は，周波数が高くなると著しく大きくなる。

問 1. 表皮効果によって，導体の実効抵抗が小さくなることはあるか。

問 2. 高周波回路では，銅管導体や細い線を多数より合わせた線を使う

ことが多い。なぜか。

(2) コイルの分布容量と等価回路

図2(a)のように，ボビンに電線を巻いてコイルを作ると，電線相互の間はかなり接近しているので，電線間に静電容量が考えられる。この静電容量は**分布容量**とよばれる。

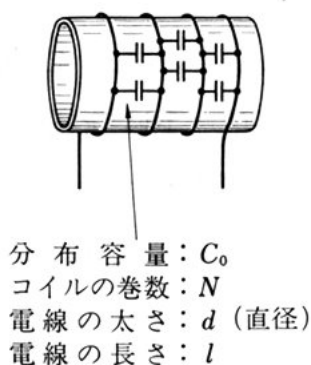
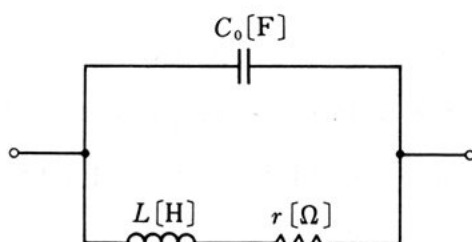
ここで，この分布容量をC_0〔F〕とし，実効抵抗をr〔Ω〕とすると，図2(a)のコイルの等価回路は，図(b)のように表すことができる。このように，インダクタンスを得る目的で，図(a)のようなコイルを作っても，実際には図(b)のように，インダクタンスと静電容量の並列回路になってしまう。

静電容量C_0〔F〕のリアクタンスは$\dfrac{1}{\omega C_0}$〔Ω〕であり，これは周波数に反比例しているので，低い周波数ではきわめて大きな値となる。したがって，この分布容量C_0は，低い周波数では無視できるが，高い周波数では，$\dfrac{1}{\omega C_0}$の値はしだいに小さくなり，C_0に流れる電流を考慮しなければならない。周波数が，この回路の共振周波数$\left(f_r=\dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC_0}}\right)$より高い場合には，コイルと考えていたものは，インダクタンスの働きではなく，静電容量と同じような働きをする

図2 コイルの分布容量と等価回路

分布容量：C_0
コイルの巻数：N
電線の太さ：d（直径）
電線の長さ：l

(a)

C_0[F]
L[H]　r[Ω]

r：実効抵抗

(b) 等価回路

ことになる。

問 3. コイルの分布容量 C_0 は 3〔pF〕であるという。そのリアタンクスは，周波数 50〔Hz〕，5〔kHz〕，5〔MHz〕，50〔MHz〕によってどのように変わるか。

問 4. 図 2(b) で，$r=0$〔Ω〕，$L=10$〔mH〕，$C_0=3$〔pF〕のとき，この回路の共振周波数はいくらか。

2. 高周波電流の測定

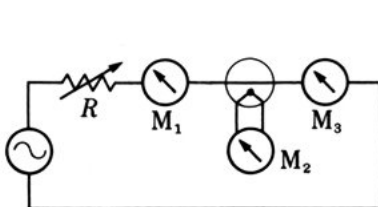
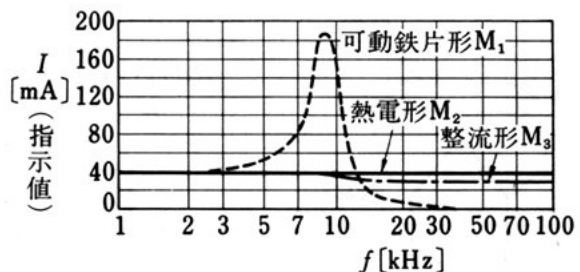
熱電電流計は，いろいろな交流電流計の中でも，周波数特性が良いので，高周波電流の測定に使われる。

(1) 高周波電流計

図 3(a) のような回路を作り，商用周波用として使われているいろいろな電流計の指示値を調べると，周波数によって図 (b) のようになり，高い周波数では正しい指示値を示さなくなる。

この理由として，コイルの分布容量 C_0〔F〕に電流が流れること，整流器や配線を通じて漏れ電流が流れること，金属部にうず電流が流れることなどが考えられる。

図 (b) からわかるように，可動鉄片形計器や整流形計器では，高周波において誤差が大きいが，熱電形計器はかなり高い周波数まで

図 3 各種の電流計の特性

(a) 測定回路　　(b) 特　性

平らな特性をもっている。

問 5. 熱電電流計の周波数特性が，可動鉄片形電流計の特性より良いのはなぜか。

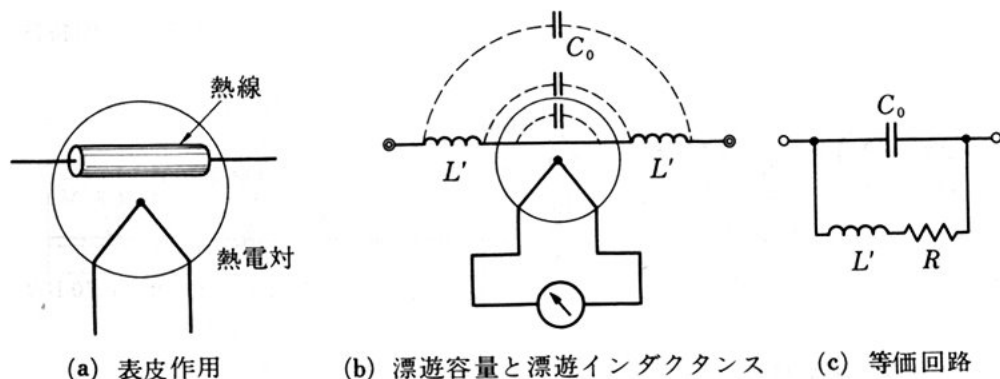
(2) 熱電電流計の誤差

熱電電流計は，周波数特性が良く，直流からかなり高い周波数の交流まで，正しい指示値を示す。しかし，きわめて高い周波数になると，次のような誤差を生じるので，注意が必要である。これらの誤差に注意して使用すれば，熱電電流計は，約 100〔MHz〕程度までの高周波電流を測定することができる。

表皮誤差　図 4 (a)に示す熱電電流計の熱線に高周波電流が流れると，表皮効果によって熱線の表皮部分に電流が集まり，熱線の抵抗が増す。したがって，同じ電流でも，高い周波数ほど熱線の抵抗値が大きくなり，発熱量が大きくなるので，計器の指示は大き目となる。すなわち，正の誤差を生じる。このような表皮効果による誤差は **表皮誤差** とよばれる。この表皮誤差を小さくするには，じゅうぶん細い熱線を使う。

共振誤差　まっすぐな1本の短い導体でも，それに電流が流れると，まわりに磁界ができることからわかるように，インダクタン

図 4 熱電電流計の誤差

(a) 表皮作用　(b) 漂遊容量と漂遊インダクタンス　(c) 等価回路

スをもつ。それで，図4(b)のような熱線や導線にも，インダクタンスがある。このようなインダクタンス L'〔H〕は，**漂遊インダクタンス**とよばれる。また，図(b)のように，直線状の熱線でも，わずかながら分布容量 C_0〔F〕をもつ。これは**漂遊容量**とよばれる。

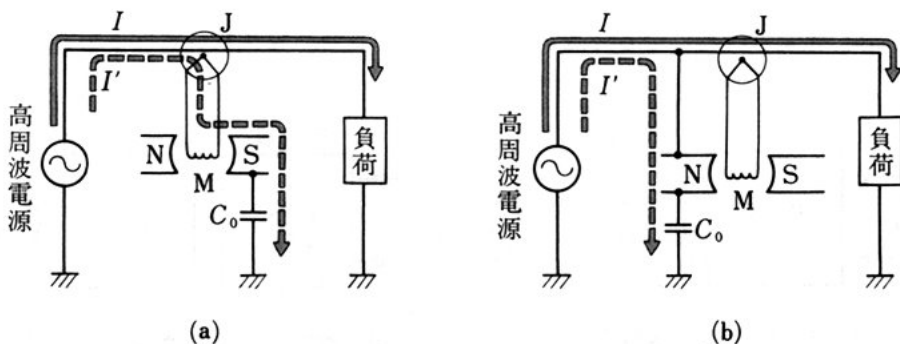
5　このような L' や C_0 のために，共振周波数 $\left(f_r=\frac{1}{2\pi\sqrt{L'C_0}}\right)$ 付近では，電流計の指示が大き目になる。すなわち，正の誤差を生じる。このような誤差は，**共振誤差**とよばれる。

共振誤差を小さくするには，熱線や導線を短くしたり，導線が平行にならないようにして，L' や C_0 を小さくする。

10　**電位誤差**　図5(a)に示すように，電流計の接地側に負荷を接続すると，電流計と大地との間にある漂遊容量 C_0 を通して，破線のように高周波電流が流れる。そこで，この電流によって，熱線の温度が上昇するので，その分だけ正の誤差を生じる。このような誤差は**電位誤差**とよばれる。この場合，熱電電流計の接地のしかたを図

15　(b)のように変えると，漂遊容量 C_0 を流れる電流が，熱線を流れなくなり，電位誤差を防ぐことができる。

問 6. 図4(c)の回路において，$L'=4$〔μH〕，$C_0=2$〔pF〕のときの共振周波数はいくらか。

図 5　熱電電流計の接続のしかた

3. 高周波電圧の測定

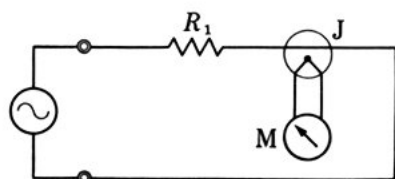
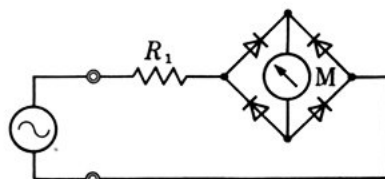
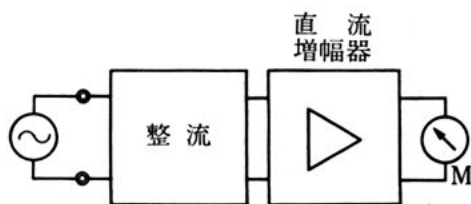
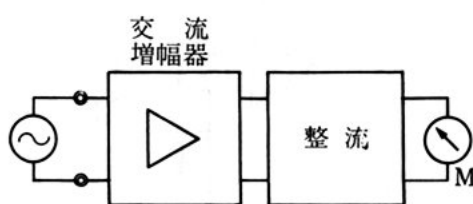
高周波電圧計の例について調べ，広く用いられているP形電子電圧計について学ぶ。

（1） 高周波用電圧計の方式

周波数特性の良い電圧計として，図6のような方式が考えられる。
図(a)の方式は，周波数特性の良い熱電電流計と，標準抵抗 R_1〔Ω〕とを組み合わせたものである。この電圧計の欠点は，その内部インピーダンスが小さいため，大きな電流が流れて，熱電対が断線しやすいことである。

図(b)の方式は，整流形計器によるもので，周波数特性の良いダイオードを使えば，かなり高い周波数まで使用できるが，計器の内部インピーダンスをきわめて大きくしようとしても，できないことがある。

図(c)の方式は，**P形電子電圧計**とよばれるものである。これは，広帯域形で，かなり高い周波数までの電圧を測定できるが，感度が

図6 各種の電圧計の方式

(a) 熱電形計器による方式

(b) 整流形計器による方式

(c) 整流してから増幅する方式

(d) 増幅してから整流する方式

わるい。

図(d)の方式は，図(c)ほど広帯域形ではないが，感度が非常に良い。ミリバルとよばれる電子電圧計は，この方式で動作している。

問 7. 熱電電圧計は，一般に，計器の内部インピーダンスが小さい。なぜか。

(2) P形電子電圧計

図7は，P形電子電圧計の原理図である。図(a)において，最大値 V〔V〕の正弦波交流電圧 v における正の半サイクルで，コンデンサ C は，ダイオードDを通して流れる充電電流により，V〔V〕まで充電される。一方，負の半サイクルでは，ダイオードDには逆方向の電圧が加わるので導通しない。したがって，コンデンサ C の電荷は，抵抗 R を通して放電する。このとき，図(b)に示すように，入力電圧 v〔V〕の周期 T〔s〕と，放電回路の時定数 $\tau=CR$〔s〕との関係を，$CR \gg T$ としておくと，コンデンサの両端の電圧 v_C〔V〕は，ほぼ一定の値 V〔V〕となる。端子A, B間の電圧 v_{AB}〔V〕は，図(a)より，$v_{AB}=v_C+v=-V+v$ がなりたつ。また，その波形

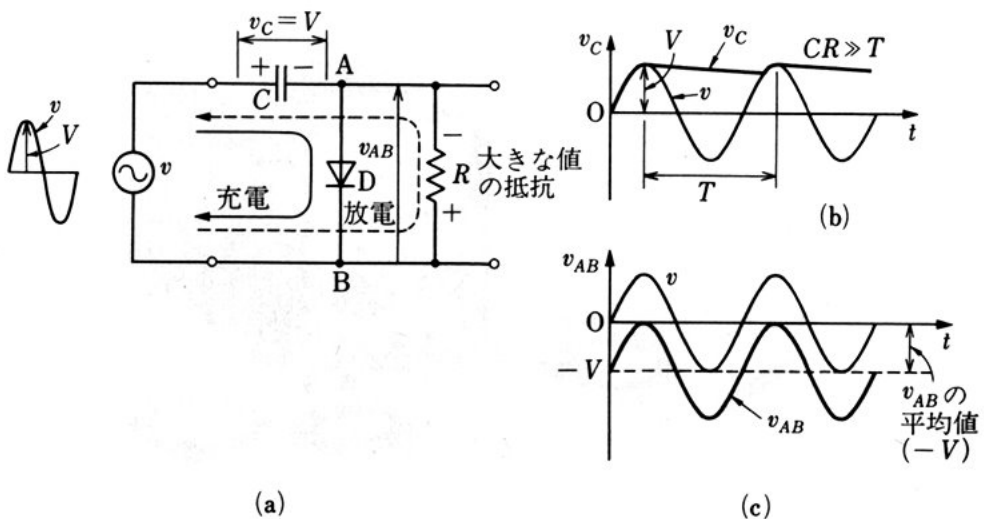
図 7 P形電子電圧計の原理

は，図(c)に示すようになる。したがって，v_{AB}〔V〕からフィルタで交流成分を取り除くと，最大値 V〔V〕に比例した直流電圧を得ることができる。したがって，この電圧計は，**ピーク形電子電圧計**ともよばれる。

図8は，P形電子電圧計の構成図である。ピーク整流部，LPF（低域通過フィルタ：low pass filter）は，直流増幅器である本体とは別になっている。この部分を**プローブ**（probe）とよぶ。

図8のような構造にすると，入力インピーダンスを大きくとれるし，測定すべき端子電圧のすぐ近くで，直流電圧に直されるので，電圧測定点と測定器本体までの途中におけるリード線の漂遊容量・

図8　P形電子電圧計

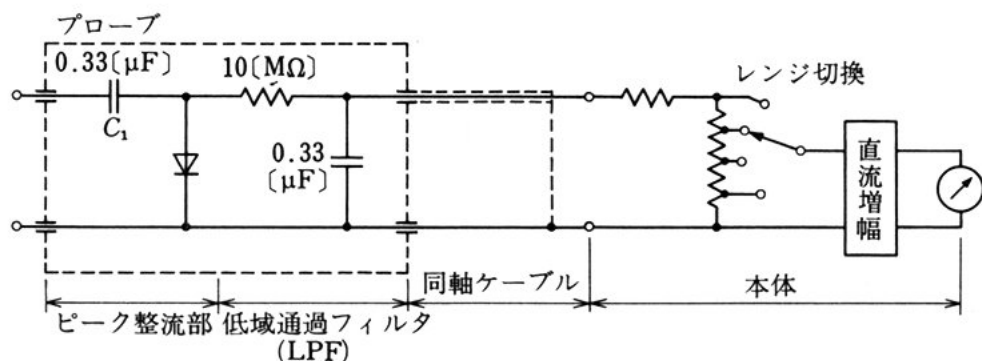
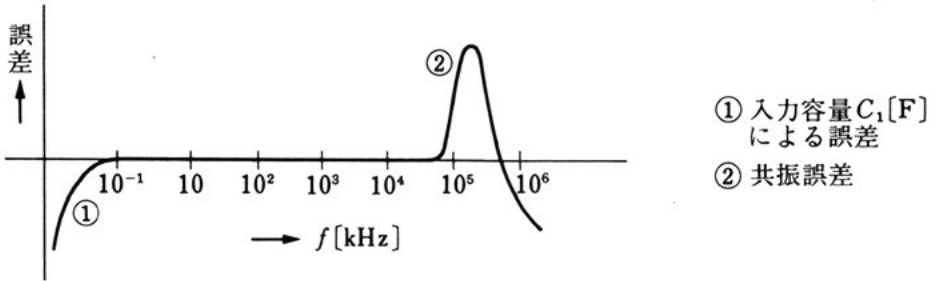



図 9　P 形電子電圧計の誤差

漂遊インダクタンスの影響を除くことができ，図9に示すように，広帯域にわたって増幅することができる。

しかし，詳しく調べると，次のような誤差を生じる。

入力回路の共振誤差　測定端子を含む入力回路の漂遊インダクタンスと漂遊容量とで共振回路ができ，その共振周波数では，図9の②のように，正の誤差を生じる。

ダイオードの接合容量による誤差　ダイオードの接合容量は，入力に対して並列に接続されている。周波数が高くなると，ダイオードのリアクタンスは小さくなり，内部抵抗が小さくなる。そのため，負の誤差を生じる。したがって，Si ダイオードよりも接合容量の小さな Ge ダイオードが使われる。

入力容量による誤差　入力容量 C_1 が小さいと，きわめて低い周波数では，リアクタンス $\frac{1}{\omega C_1}$〔Ω〕は大きな値となる。このため，図9の①のように，負の誤差を生じる。

波形誤差　指示計器の目盛は，入力が正弦波である場合を考えて，最大値に対応した正弦波の実効値で示してある。したがって，最大値は同じでも正弦波以外の波形を，P 形電子電圧計で測定する場合には，その波形の正しい実効値を示すことができない。これを**波形誤差**という。

問 8.　P 形電子電圧計では，直流電圧は測定できない。なぜか。

4. 高周波電力の測定

電力計には，消費形電力計と通過形電力計とがあり，その例について調べる。

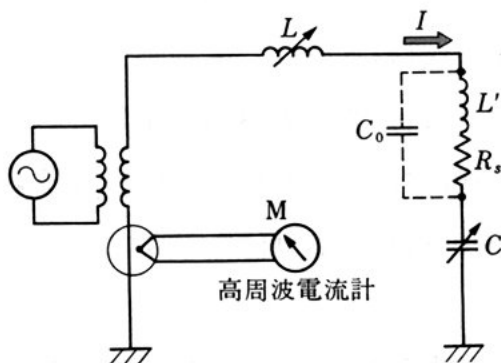
(1) 消費形電力計

消費形電力計は，測定したい電力を全部負荷に消費させて，電力を測定するものである。 5

標準負荷による電力測定　発振器（高い周波数の交流を発生する装置）などの出力電力を測定する場合，図10のように，標準負荷抵抗 R_s〔Ω〕で消費する電力 P〔W〕を測定することによって行う。図10で，P〔W〕を測定するには，高周波電流計Mによって，回路電流 I〔A〕を測定し，次の式で計算する。 10

$$P = R_s I^2 \qquad (2)$$

この場合，R_s〔Ω〕がわかった値，すなわち標準負荷抵抗であれば，この方法で正しく消費電力が求められるが，一般には，R_sには，漂遊容量 C_0〔F〕，漂遊インダクタンス L'〔H〕がある。このような場合には，L〔H〕，C〔F〕を調節して，回路のリアクタンス分を0にする工夫がなされている。 15

図10 標準負荷法

ボロメータ電力計　ボロメータとよばれるものは，抵抗の温度係数の大きな素子である。図 11 においてスイッチ S を開き，高周波電力をボロメータ R_s〔Ω〕に加えないとき，抵抗 R_0〔Ω〕を調整して，ブリッジ回路の平衡をとる。そのとき，ボロメータに流れる直流電流 I_0〔A〕を測定する。次に，高周波電力を加えると，ボロメータの温度が上がり，抵抗値が変わるため，ブリッジ回路の平衡は破れる。そこで再び R_0 を調整し，ブリッジ回路の平衡をとって，ボロメータに流れる電流 I〔A〕を測定する。この 2 回の測定から，高周波電力 P〔W〕は，次の式で求められる。

$$P=\frac{R_1R_3}{R_2}(I_0^2-I^2) \qquad (3)$$

この場合，測定したい電力全部をボロメータで消費させないと誤差を生じるので，この点に注意する必要がある。

ボロメータとして使われるサーミスタとバレッタの特性例を，図 12 に示す。

問 9． 図 10 において，$R_s=500$〔Ω〕，$I=2$〔mA〕であるという。消費電力 P を求めよ。

問 10． 図 11 において，$R_1=200$〔Ω〕，$R_2=100$〔Ω〕，$R_3=50$〔Ω〕，$I_0=1$〔mA〕，$I=0.8$〔mA〕であるという。高周波電力 P を求めよ。

問 11． 標準負荷抵抗は，どのような点に注意して作る必要があるか。

図 11　ボロメータ電力計

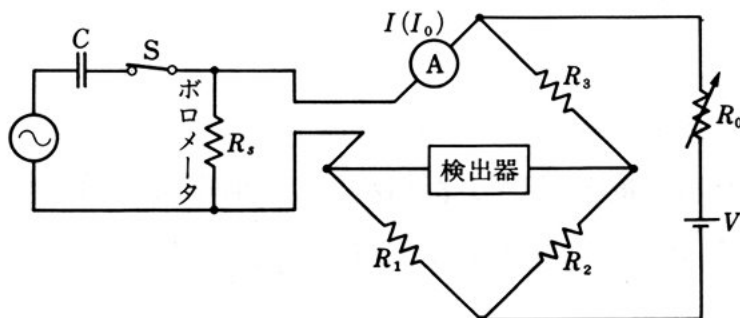
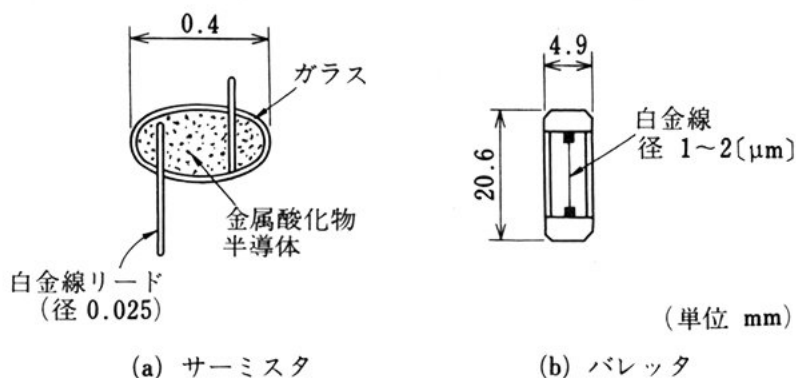
(a) サーミスタ (b) バレッタ

	サーミスタ	バレッタ
抵抗の温度係数	負	正
時定数〔s〕	約1	約350μ
感度〔Ω/mW〕	35	5
寸法〔mm〕	径0.4	径1.6μ, 長さ2.25

図 12 サーミスタ・バレッタの特性例

(2) 通過形電力計

通過形電力計では，電流力計形と同じように，電力は電力計を通過して負荷に供給される。この電力計は，負荷で消費する電力を測定するもので，求めたい電力が電力計を通過していくことから，通過形とよばれる。

C-C 形電力計 図13で，C_1は，小容量のコンデンサで，負荷の端子電圧 $\dot{V}$〔V〕に比例する電流 $\frac{1}{2}\dot{I}_V$〔A〕を，熱電対 J_1, J_2 (抵抗 R〔Ω〕) に流すためのものである。C_2は，大容量のコンデンサで，負荷電流に比例する電流 $\dot{I}_I$〔A〕を流すためのものである。

もし，負荷に電圧 $\dot{V}$〔V〕が加わり，負荷電流 $\dot{I}$〔A〕が流れるとすれば，C_1に流れる電流 $\dot{I}_V$〔A〕は，$\frac{1}{\omega C_1} \gg R$ として，次のようになる。

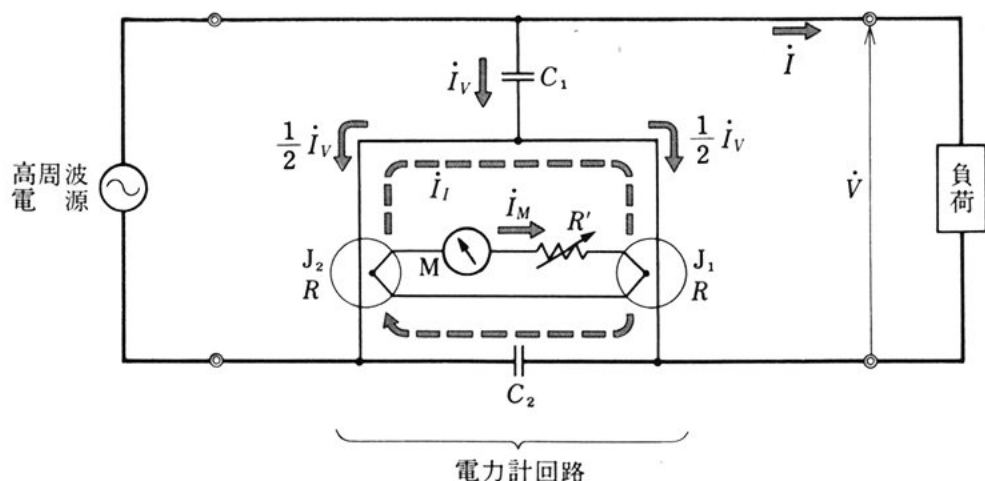



図 13 C-C 形電力計

$$\dot{I}_V=\frac{\dot{V}}{\dfrac{R}{2}+\dfrac{1}{j\omega C_1}}\doteqdot j\omega C_1\dot{V} \tag{4}$$

次に，C_2 には負荷電流 $\dot{I}$〔A〕が流れているので，$\dfrac{\dot{I}}{j\omega C_2}$〔V〕の電圧降下があり，それによって，破線のような電流 $\dot{I}_I$〔A〕が流れる。$R\gg\dfrac{1}{\omega C_2}$ であるとき，$\dot{I}_I$ は次のようになる。

$$\dot{I}_I\doteqdot\frac{\dot{I}}{j\omega C_2}\cdot\frac{1}{2R} \tag{5}$$

それで，熱電対 J_1, J_2 の電流は，$\left(\dfrac{1}{2}\dot{I}_V+\dot{I}_I\right)$, $\left(\dfrac{1}{2}\dot{I}_V-\dot{I}_I\right)$〔A〕となる。熱電電流計は，二乗特性をもっているから，計器の電流 I_M〔A〕は，次のようになる。

$$I_M=K\left\{\left(\left|\frac{1}{2}\dot{I}_V+\dot{I}_I\right|\right)^2-\left(\left|\frac{1}{2}\dot{I}_V-\dot{I}_I\right|\right)^2\right\}=2K\dot{I}_V\dot{I}_I$$

$$=\frac{KC_1}{RC_2}\dot{I}\dot{V}=K'P \tag{6}$$

このことから，I_M は，電力 P〔W〕に比例するので，計器 M に電力目盛を施すことができる。この種の電力計は，**C-C 形電力計**とよばれ，短波帯（3～30〔MHz〕）で使われている。

5. 高周波インピーダンスの測定

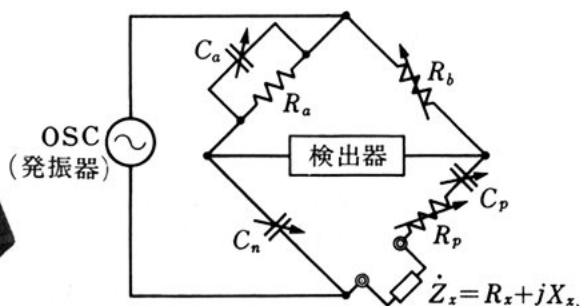
高周波インピーダンスの測定に広く使われているシェーリングブリッジ・差動ブリッジ・Q メータについて調べる。

(1) シェーリングブリッジ

図14(a)は，シェーリングブリッジの外観であり，図(b)は，その原理図である。ブリッジを構成している素子は C と R であり，素子や配線の漂遊インダクタンス・漂遊容量・表皮効果などがほとんどないように工夫されている。このブリッジは，高周波インピーダンスの精密測定によく使われている。

図(b)において，OSC は発振器であり，検出器には高感度高周波電圧計や無線周波受信機が用いられる。

測定原理と方法 測定は2回に分けて行う。まず測定端子を短絡し，R_a, R_b, R_p〔Ω〕および C_n〔F〕をある値にし，C_a, C_p〔F〕を調節して，ブリッジを平衡させる。このとき，C_a, C_p が C_{a1}, C_{p1}〔F〕であるとすると，次の式がなりたつ。

図 14 シェーリングブリッジ

(a) 外観　　(b) 原理図

$$\left.\begin{aligned} R_p &= R_b\frac{C_{a1}}{C_n} \\ \frac{1}{j\omega C_{p1}} &= \frac{R_b}{R_a}\cdot\frac{1}{j\omega C_n} \end{aligned}\right\} \qquad (7)$$

次に，測定端子に，値のわからないインピーダンス $\dot{Z}_x=R_x+jX_x$〔Ω〕を接続し，再び C_a, C_p を変えて平衡させる。このときの C_a, C_p の値を C_{a2}, C_{p2}〔F〕とすると，次の式がなりたつ。

$$\left.\begin{aligned} R_x+R_p &= R_b\frac{C_{a2}}{C_n} \\ jX_x+\frac{1}{j\omega C_{p2}} &= \frac{R_b}{R_a}\cdot\frac{1}{j\omega C_n} \end{aligned}\right\} \qquad (8)$$

式（7），（8）から，次の式が得られる。

$$R_x=\frac{R_b}{C_n}(C_{a2}-C_{a1}), \qquad X_x=\frac{1}{\omega}\left(\frac{1}{C_{p2}}-\frac{1}{C_{p1}}\right) \qquad (9)$$

〔例〕 $f=10$〔MHz〕, $R_b=500$〔Ω〕, $C_n=200$〔pF〕, $C_{a1}=200$〔pF〕, $C_{p1}=400$〔pF〕, $C_{a2}=300$〔pF〕, $C_{p2}=200$〔pF〕であれば，
$R_x=\frac{500}{200}\times(300-200)=\frac{500}{2}=250$〔Ω〕,
$X_x=\frac{1}{2\pi\times10^7}\times\left(\frac{1}{200\times10^{-12}}-\frac{1}{400\times10^{-12}}\right)=\frac{0.25\times10^{10}}{2\pi\times10^7}=\frac{250}{2\pi}$
$=39.8$〔Ω〕である。

（2） Q メ ー タ

L, C の共振現象を利用して，素子の定数を容易に測定できるようにしたものに，**Qメータ**とよばれるものがある。ここでは，Q メータの基本的なことがらについて調べる。

図 15 (a) は，Q メータの外観であり，図 (b) は，その原理図である。

Q メータの共振周波数　図 15 (b) のような回路において，高周波電源は，いろいろな周波数の電圧を発生できるもので，その電流は，低抵抗 R〔Ω〕，およびコイル L〔H〕，r〔Ω〕，コンデンサ C_s

(a) 外　観

(b) 原 理 図

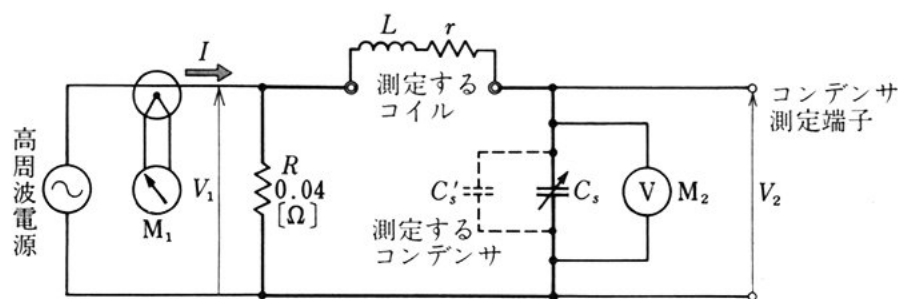
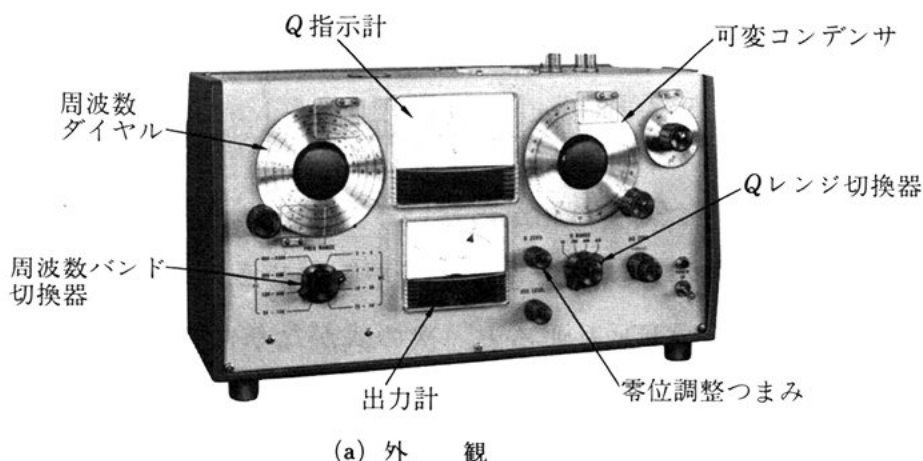



図 15 Q メ ー タ

〔F〕からなる太線の共振回路に流れ込む。

この場合，電流 I〔A〕を一定に保って，周波数 f〔Hz〕だけを変化すると，次の式がなりたつとき，C_s〔F〕の電圧 V_2〔V〕は最大となる。

$$\boldsymbol{f_r \fallingdotseq \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_s}}} \qquad (11)$$

5

〔例〕 $L=200$〔μH〕，$C_s=126.6$〔pF〕であれば，f_r は次のようになる。

$$f_r=\frac{1}{2\pi\sqrt{200\times10^{-6}\times126.6\times10^{-12}}}=10^6\text{〔Hz〕}=1000\text{〔kHz〕}$$

Q メータは，コイルの $Q\left(=\frac{\omega L}{r}\right)$ (コイルの良さ) を測定する装置で，コイルのインダクタンス L〔H〕や，コンデンサの静電容量 C〔F〕を測ることができ，そのほか，いろいろな測定に応用することができる。

Q メータによる L の測定　図(b)において，L〔H〕のコイルを測定端子に接続し，f〔Hz〕のとき，C_s〔F〕で共振したとすれば，式(11)から，コイルのインダクタンス L〔H〕は，次のようになる。

$$L=\frac{1}{4\pi^2 f_r^2 C_s} \qquad (12)$$

〔例〕 $C_s=200$〔pF〕，$f_r=1000$〔kHz〕であれば，L は，次のようになる。

$$L=\frac{1}{4\pi^2\times10^{12}\times200\times10^{-12}}=127\,〔\mu\mathrm{H}〕$$

Q メータによるコイルの Q の測定　図(b)において，M_1 の指示を一定値に設定し，周波数を f_r〔Hz〕に設定して，電子電圧計 M_2 の読みを調べると，f_r〔Hz〕における Q の値を直読することができるようになっている。

Q メータによる C の測定　図(b)において，あるコイル L〔H〕と，$C_s=C_1$〔F〕との間で，f_r〔Hz〕の周波数において共振しているとする。そこで，C_s 端子に値のわからない C_s'〔F〕のコンデンサを接続すると，共振しなくなり，C_s を C_2〔F〕に減少すると，再び共振するようになったとする。このとき，C_s' は $C_s'=C_1-C_2$ として求められる。

コイルの分布容量　図(b)の Q メータの共振回路で，コイルの分布容量を C_0〔F〕とすると，図(b)は，図16(a)のように示される。

ここで，$r \fallingdotseq 0$〔Ω〕として，端子1，2間のインピーダンス$\dot{Z}$〔Ω〕を求めると，次のようになる。

$$\dot{Z}=\frac{j\omega L\frac{1}{j\omega C_0}}{j\omega L+\frac{1}{j\omega C_0}}+\frac{1}{j\omega C}=\frac{j\omega L}{1-\omega^2 LC_0}+\frac{1}{j\omega C}$$

$$=\frac{1-\omega^2 L(C+C_0)}{j\omega C(1-\omega^2 LC_0)} \qquad (13)$$

したがって，共振周波数f_r〔Hz〕は，次の式で示される。　5

$$f_r=\frac{1}{2\pi\sqrt{L(C+C_0)}} \qquad (14)$$

この周波数は，図16(b)の共振周波数と同じである。

分布容量の測定　図16(a)または図(b)において，$f_r=f_1$〔Hz〕のとき，$C=C_1$〔F〕で回路が共振しているとし，次に，$f_r=2f_1$〔Hz〕のとき，$C=C_2$〔F〕で回路が共振しているとすれば，次の式がなりたつ。　10

$$\left.\begin{aligned} f_1&=\frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_1+C_0)}} \\ 2f_1&=\frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_2+C_0)}} \end{aligned}\right\} \qquad (15)$$

式(15)から，次の式が得られる。

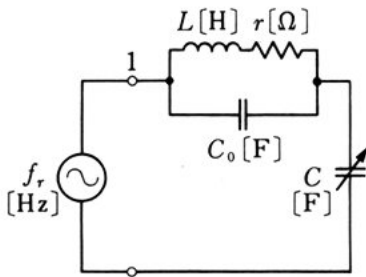
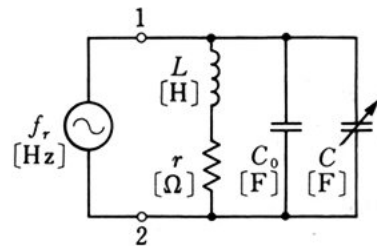



図16　コイルの分布容量

$$C_0=\frac{C_1-4C_2}{3} \tag{16}$$

これから，分布容量が求められる。

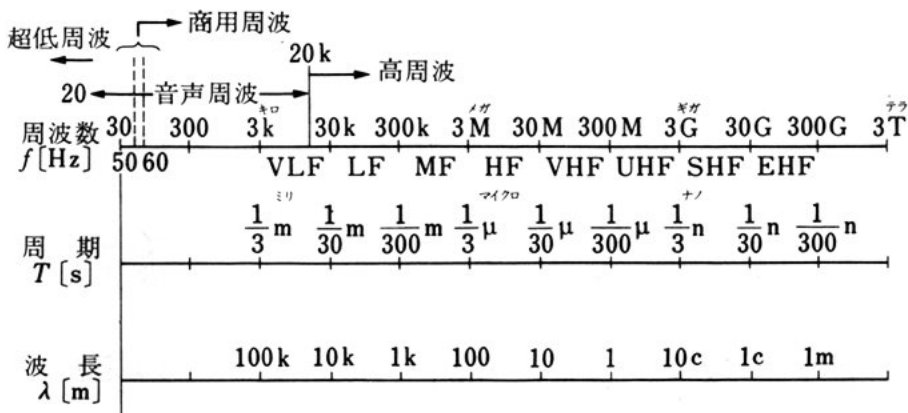
問 12. 200〔kHz〕で，350〔pF〕に共振するコイルの L はいくらか。

問 13. 図16(a)の回路で，$f_r=1$〔MHz〕のとき，$C=200$〔pF〕で共振し，$f_r=2$〔MHz〕のとき，$C=45$〔pF〕で共振した。コイルの分布容量 C_0 を求めよ。

6. 高い周波数の測定

(1) 周波数・波長

実用に供されている交流の周波数は，図17のように，広範囲にわたっている。図で，50〔Hz〕，60〔Hz〕は**商用周波**，20〔Hz〕～20〔kHz〕は**音声周波**，それ以上は**高周波**とよばれる。高周波はまたいろいろな名称でよばれている。なお，交流の変化の速さを表すのに，周波数 f〔Hz〕の代わりに，波長 λ〔m〕を使うことがある。この場

図 17 周波数・周期・波長

$T=\frac{1}{f}$〔s〕，$\lambda=\frac{3\times10^8}{f}$〔m〕

合，交流の伝わる速度を $c=3\times10^8$〔m/s〕と考え，これが $f\lambda$ に等しくなることから，次の式によって波長を決める。

$$\lambda=\frac{3\times10^8}{f} \qquad (17)$$

問 14. 周波数 50〔Hz〕の波長はいくらか。

問 15. 波長 1〔m〕の周波数はいくらか。

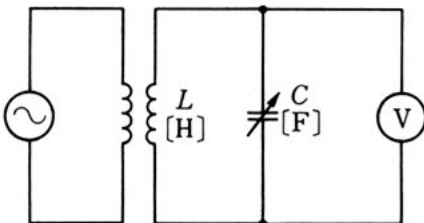
（2） 吸収形周波数計

図 18 のように，インダクタンス L〔H〕のわかっているコイルと，回転角度によって値が変わる可変コンデンサ C〔F〕とを使って共振回路を作り，交流電源回路の磁界などによって，コイルに電圧を誘導し共振させる。共振周波数から被測定周波数 f_x〔Hz〕は，次の式で得られる。

$$f_x=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \qquad (18)$$

上式で，L と C の値がわかれば，電源の周波数は計算できる。このようなしくみの周波数計は，一般に，**吸収形周波数計** とよばれる。実際には，式 (18) によって計算しないですむように，直読目盛になっているものや，グラフを利用するものがある。このような周波数計はふつう，測定精度は数パーセントで，あまり良くはないが，比較的小形・軽量・安価なため，高い周

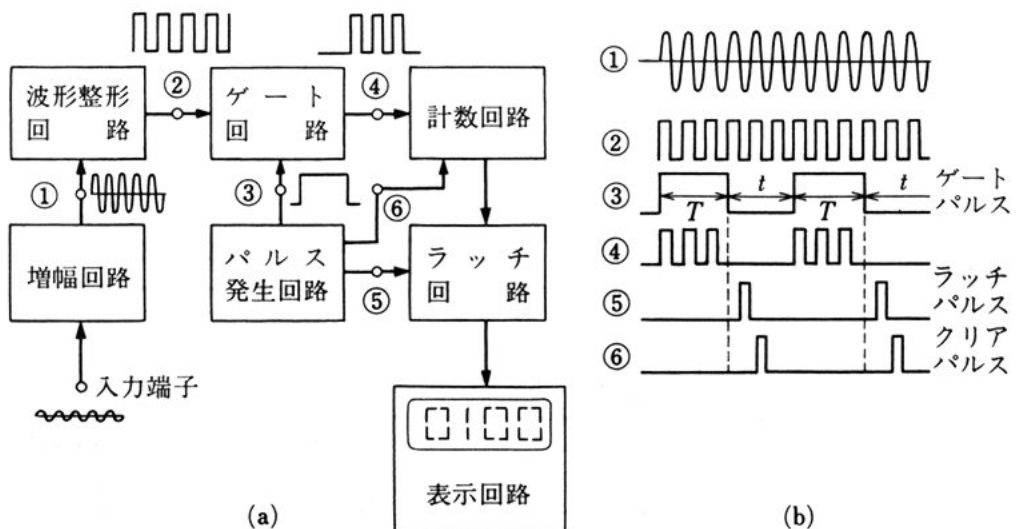
図 19 吸収形周波数計

図 18 吸収形周波数計の原理

波数の測定に使われる。図19に，その外観を示す。

問 16. $L=1$〔mH〕，$C=400$〔pF〕で共振した。周波数はいくらか。

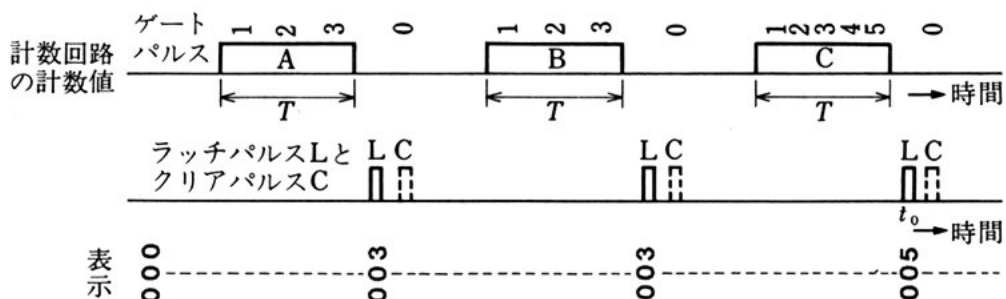
（3） ディジタル周波数計

図20は，ディジタル周波数計の原理図である。図(a)に示すように，入力信号を増幅回路により，波形整形回路の入力電圧として，じゅうぶん大きな値になるまで増幅する。この増幅された電圧波形は，波形整形回路により，立ち上がり・立ち下がりの速いパルス波形に整形される。ゲート回路では，図(b)で示されるように，パルス発生回路より出力されたゲートパルスのパルス幅 T の期間だけ，波形整形されたパルスを出力することができるようになっている。したがって，ゲート回路の出力波形は④で示される。計数回路では，期間 T の間に存在するパルスの数を計数する。その値は，ラッチ回路を経て表示回路により表示される。例えば，$T=1$ [ms] とし，その間に100個のパルスを計数したとすると，表示は100となる。単位は [kHz] である。

図 20 ディジタル周波数計の原理

計数回路では，期間 T の間に存在するパルス数を計数するが，図 (b) に示す期間 t の間に計数値を0にもどしておかなければならない。そのために，**クリアパルス** (clear pulse) が必要である。計数値を0にもどしておかないと，期間 T ごとに計数された値が，積算されて表示されてしまう。

ラッチ回路　計数回路の計数値は，1, 2, 3, ……というように，時々刻々変化している。したがって，この値を直接表示回路に導くと，表示の内容も時々刻々に変化してしまい，何を表示しているかわからなくなってしまう。そこで，期間 T の間の最終計数値 N_0 (図20では $N_0=3$) だけをつかまえて (latch して) 一時記憶させておき，この記憶された値 N_0 を表示すれば，見やすい表示となる。その役割を果たすのが**ラッチ回路**である。N_0 を瞬間的につかまえて，ラッチ回路に記憶させるためのパルスを**ラッチパルス**という。

図21が，ラッチ回路の動作のあらましを示したものである。ゲートパルスの直後に発生するラッチパルスにより，$N_0=3$ がラッチ回路に記憶され，その値が表示回路に伝えられる。クリアパルスにより，計数回路は0となり，次のゲートパルスを待っている。ゲートパルスCの期間 T では，周波数が高くなり，$N_0=5$ まで計数したとすると，時刻 t_0 におけるラッチパルスにより，$N_0=5$ が，ラ

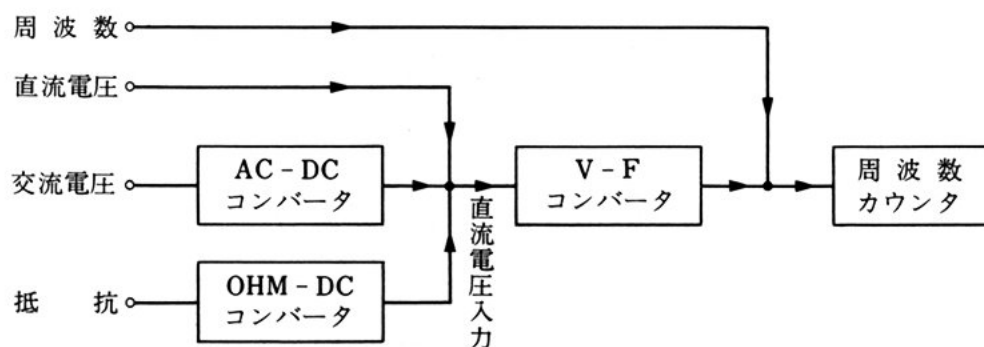
図 21　ラッチパルスの動作のあらまし

ッチ回路に記憶され，表示される。N_0, Tと，周波数fとの間には，$f=\dfrac{N_0}{T}$の関係がある。

問 17. $T=10$ [ms]，$N_0=152$のとき，入力信号の周波数を求めよ。

（4） ディジタルマルチメータ

5 最近では回路計の代わりにディジタルマルチメータがよく使われる。図22がその構成例であり，周波数・直流電圧・交流電圧・抵抗を測定することができる。交流電圧および抵抗は，それぞれいちどその大きさに比例した直流電圧に直される。交流電圧を直流電圧に直す回路をAC-DC変換器（AC-DCコンバータ），抵抗を直流電
10 圧に直す回路をOHM-DC変換器（OHM-DCコンバータ）という。直流電圧は，その大きさに比例した周波数のパルスに直される。この回路を電圧-周波数変換器（V-Fコンバータ）という。したがって，このパルスをディジタル周波数計が測定することにより，周波数・直流電圧・交流電圧・抵抗を測定することができる。

15 なお，一般に，アナログ量をディジタル量に変換する装置，あるいは素子をA-Dコンバータという。

図 22 ディジタルマルチメータの構成例

7. トリガ式オシロスコープ

(1) トリガ式オシロスコープの原理

図23は，トリガ式オシロスコープの構成図である。入力信号は，減衰器により，その大きさを調整し，垂直増幅回路で増幅され，ブラウン管の垂直軸偏向板に加えられる。

トリガ発生回路では，垂直増幅された入力信号が設定されたレベルを通過するごとに，図24(b)のように，正極性・負極性のパルス

図 23 トリガ式オシロスコープの構成

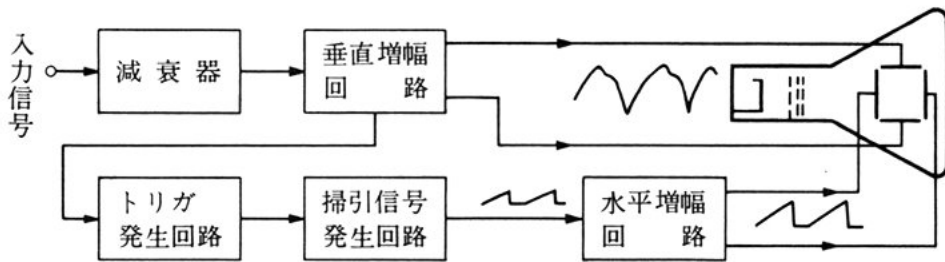
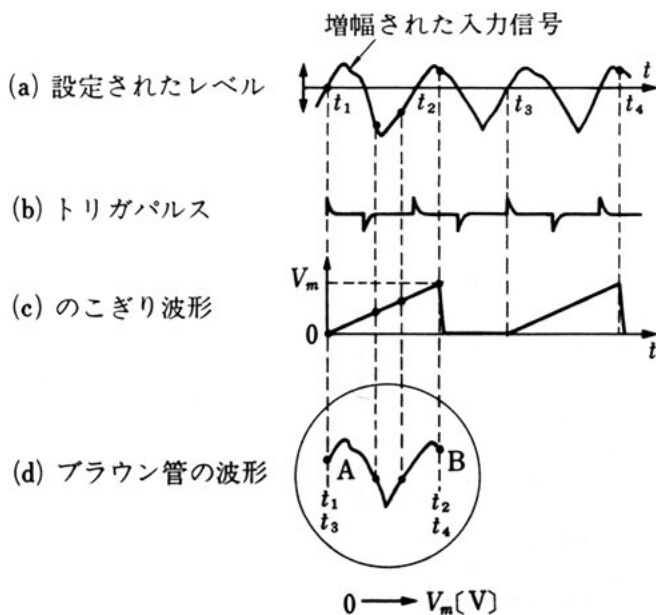
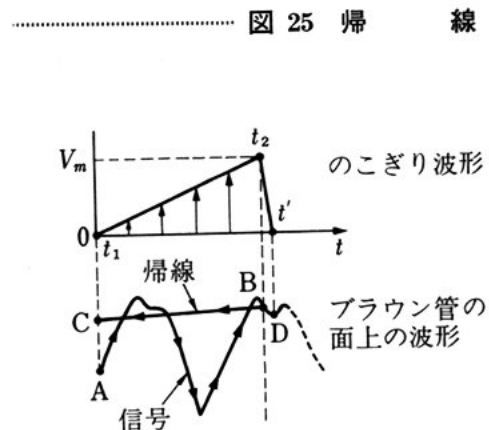



図 24 トリガ式オシロスコープの動作のあらまし

を発生する。このパルスは，次の掃引信号発生回路が動作を開始するための引き金となるので，**トリガパルス** (trigger pulse) とよばれる。いま，正極性のトリガパルスが発生したときに，掃引信号発生回路が動作するようにしておくと，図(c)のように，時刻 t_1, t_3, ……において，直線性の良いのこぎり波状電圧の発生が開始される。こののこぎり波状電圧は，ある一定の電圧に到達すると，自動的にその動作を完了するようになっている。そして，次のトリガパルスが入力されると，掃引信号発生回路は，再び動作を開始して，のこぎり波状電圧を出力する。この波形は，水平増幅回路を通って，図(c)に示す最大値 V_m〔V〕の，のこぎり波状電圧となり，ブラウン管の水平軸偏向板に加えられる。したがって，ブラウン管の面上には，図(d)に示す波形が映し出される。点Aは，時刻 t_1, t_3, …… に対応する垂直軸方向の電圧と，のこぎり波状電圧による水平軸方向の電圧 0〔V〕とによって定まる。点Bは，t_2, t_4, …… に対応する電圧と，V_m〔V〕とによって定まる。

このとき，t_1, t_3, …… における入力波形のレベルは，図(a)に示すように，同じであるから，つねに同じ波形がブラウン管に映し出されることになり，安定した波形を観測することができる。

帰線消去　図25に示すブラウン管の面上には，時刻 t_1 から t_2，そして t' までの間に二つの波形がかかれる。一つは点Aから点Bまでの入力信号波形であり，もう一つは点Bから点Cまでの直線である。t' における垂直方向のレベルは，点Dであるが，のこぎ

図25 帰　　線

り波状電圧は 0 [V] であるので，ブラウン管の面上では，点 C で示される。線分 BC を**帰線**という。本来，帰線は余分なものであるから，オシロスコープでは，帰線を映し出さないようにしている。これを**帰線消去**という。

リサジュー図形による周波数と位相差の測定　図 26 に示すように，オシロスコープを X-Y 動作にしておき，それぞれの入力に正弦波交流を加え，X 軸，Y 軸の感度を等しくしておくと，周波数の比および位相差に応じて，図 27 に示すリサジュー図形がかかれる。このことから，X 軸の周波数が 10〔kHz〕のときに，図 28 の左上のリサジュー図形がかけたとすれば，それを X 軸，Y 軸に分

図 26　オシロスコープ

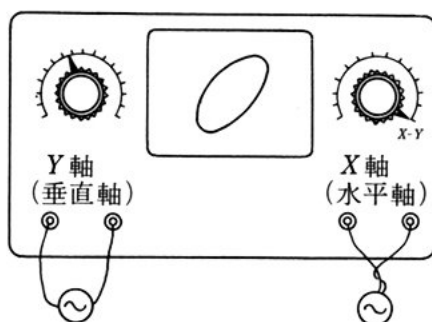



図 27　リサジュー図形と周波数比

周波数比 Y軸：X軸	位相差（X軸の遅れ）		
	0°	45°	90°
1：1			
1：2			
1：3			
2：3			

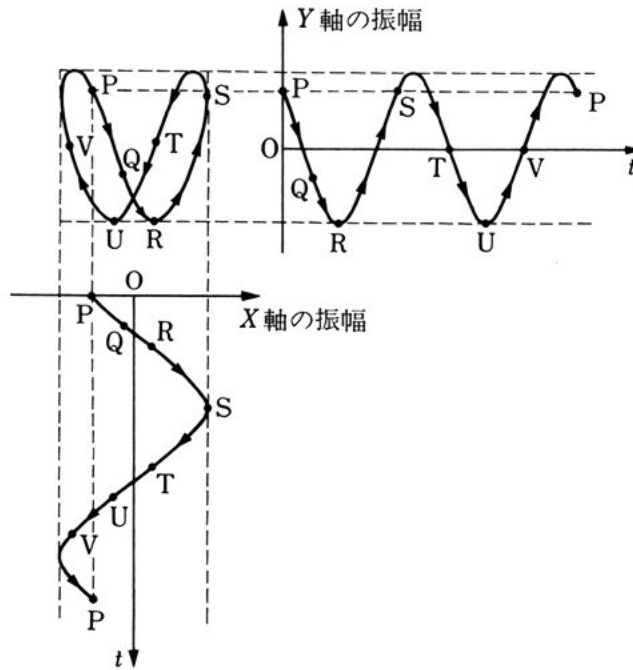



図 28　リサジュー図形

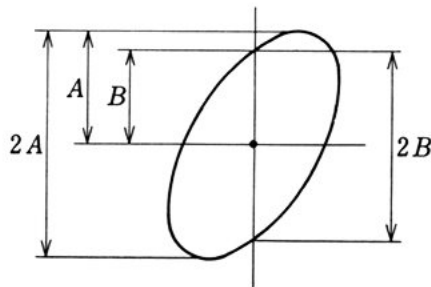



図 29　位　相　測　定

けて考えることにより，Y 軸の周波数は，20〔kHz〕であることがわかる。

位相差 θ は，図 29 より，$\sin\theta = \dfrac{2B}{2A}$ から求めることができる。

問 18. トリガ式オシロスコープでは，入力信号がない場合，ブラウン管の面上に輝線が現れるか，現れないか。

問　　題

1. 表皮効果とは何か。また，太い1本の線（断面積 A〔m^2〕）の抵抗と，断面積の和が同じ A〔m^2〕となる10本の線の束の抵抗とは，どちらが大きいか。直流および高周波について考えよ。
2. コイルの分布容量とはどんなものか。また，どんなときに問題になるか。
3. 熱電形高周波電流計の誤差の原因を三つ挙げ，その防止策を述べよ。
4. 高周波電圧計にはどのようなものがあるか。また，その特徴を述べよ。
5. P形電子電圧計の内部抵抗はきわめて大きい。なぜか。
6. 図11に示すボロメータ電力計において，求めたい高周波電力が式（3）で示されることを説明せよ。
7. Qメータで，コイルのQを測定したら，$Q=100$となり，共振時のCの値は$C=250$〔pF〕，周波数fの値は$f_r=1$〔MHz〕であった。分布容量C_0を無視できるとして，コイルのインダクタンスL，実効抵抗rを求めよ。
8. 熱電形高周波電流計の使用上の注意を述べよ。
9. 高周波において，電圧・電流・電力・インピーダンスを測定する場合，低周波や直流に比較して，どのような点に注意する必要があるか。
10. ディジタル周波数計の原理を述べよ。また，測定精度はどのくらいか。
11. X軸の周波数が1〔kHz〕，Y軸の周波数が3〔kHz〕のときのリサジュー図形をかけ。

2 応用計測

この節のねらい　テレビジョン・自動車・クーラー・冷蔵庫・ロボットなど，工業技術の発展には目をみはるものがある。そこには，いろいろな物理量・化学量が取り扱われている。この節では，これらの量を測定する方法や，さらに測定値を遠隔地に送る方法について学ぶ。

1. センサの利用

物理量・化学量をその量に比例した電流・電圧・抵抗などの電気に関する量に変換する素子，あるいは部品を**センサ**という。電気に関する量に変換すると，たとえその量が小さくても，容易に増幅することができ，取り扱いが便利である。

図1は，ある装置内に発生した物理量，あるいは化学量を知りたい場合，センサにより，その量に比例する電気に関する量として取り出し，表示回路あるいは指示回路に，その量の大きさを示せばよいことを表している。また，物理量を制御する場合，変換された量の大小を判断して装置に帰還させることにより，元の物理量を制御

図1 センサの利用

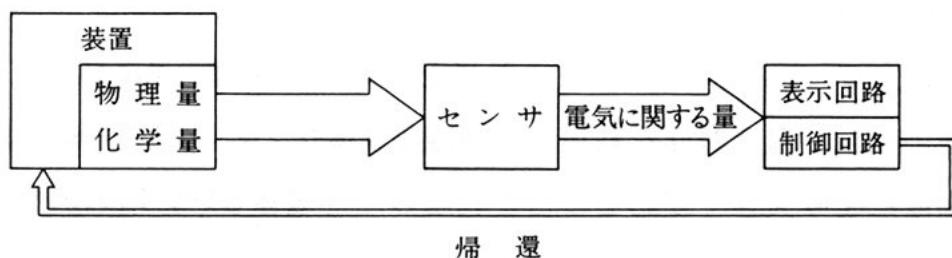
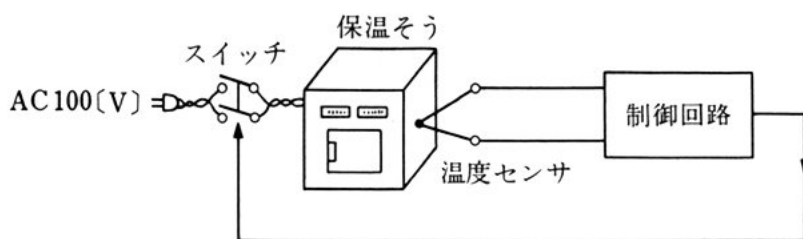



図2 恒 温 そ う

することもできる。このための回路を**制御回路**という。

図2に，具体例として恒温そうを示す。保温そうの中にはヒータが入っている。保温そう内の温度 T を温度センサによって検出し，一定に保ちたい温度 T_0 と比較し，温度 T の方が高ければスイッチを切って温度を下げ，低ければスイッチを入れた状態で温度を上げる。このとき，T および T_0 は，その温度に比例した電圧に変換して制御回路に取り入れられる。設定値 T_0 を変えることにより，保温そうを任意の温度に保つことができる。実際には，センサ・制御回路・スイッチは，保温そう内に収められており，これを**恒温そう**という。

2. 各種のセンサ

表1にどのようなセンサがあるかを示した。ここでは，いくつかのセンサについて，その応用例を示しながら学習する。

(1) 温度センサ

温度センサには，ゼーベック効果を利用した**熱電対温度センサ**，金属の抵抗－温度特性を利用した**測温抵抗体センサ**，半導体の抵抗値が温度により大きく変わることを利用した**半導体センサ**に大別することができる。

表 1　各種のセンサ

検出対象	セ　ン　サ
光	ホトトランジスタ，CdS
温　度	熱電対，白金測温抵抗体，サーミスタ，バイメタル，トランジスタ
圧　力	半導体圧力センサ，感圧ダイオード，感圧トランジスタ，ストレインゲージ
超音波	チタン酸バリウム振動子，PZT 振動子，フェライト振動子
湿　度	多孔質セラミックセンサ
磁　気	ホール素子，磁気抵抗素子
ガ　ス	接触燃焼式ガスセンサ，半導体ガスセンサ，$\gamma-Fe_2O_3$ ガスセンサ
水　質	pH センサ
放射線	GM 計数管，シンチレーション計数管

熱電対温度センサ　図3に示すように，2種類の金属 A と B を接続し，二つの接点 P と Q の温度に差があると，熱起電力 V_t〔V〕が発生する。図4は，JIS で定められた，いろいろな熱電対に対する熱起電力の例である。この温度センサは，高温で使用できる特徴がある。

サーミスタ温度センサ　サーミスタの抵抗 R_T〔kΩ〕の温度特性は，図5(a)に示すように，直線性が非常にわるいが，図(b)のように他の抵抗と接続すると，その合成抵抗 R_t〔kΩ〕の温度特性は，直線性がかなり良くなる。

図 3　熱電対の原理　図 4　いろいろな熱電対の特性

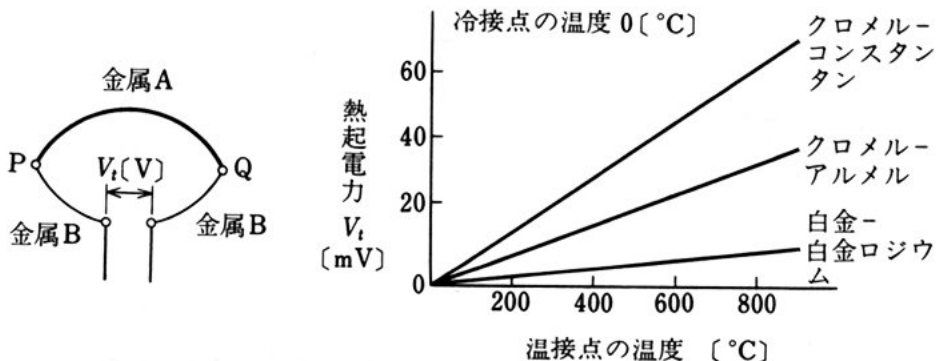
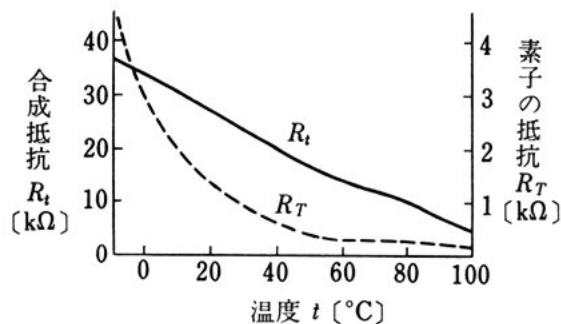
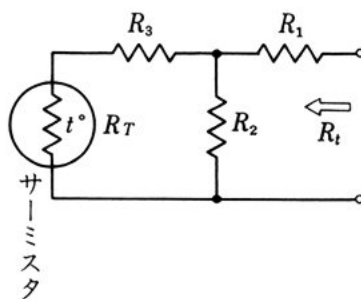



図 5　サーミスタの特性例

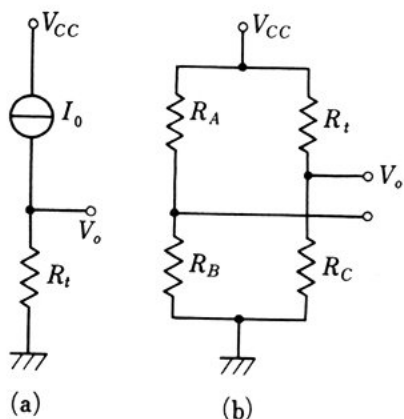



図 6　電圧の取り出し方

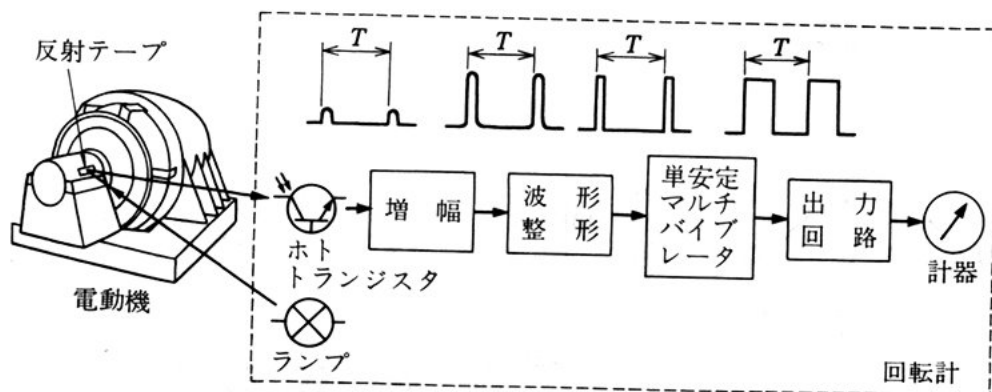



図 7　ホトトランジスタによる電動機の回転計

温度を電圧に変換して取り出すには，図6(a)，(b)のような方法がある。図(a)は，合成抵抗 R_t〔kΩ〕に定電流 I_0〔A〕を流しておき，端子より $V_0=R_tI_0$〔kV〕の電圧を取り出す方法である。また，図(b)は，ブリッジ回路の一辺に合成抵抗 R_t〔kΩ〕を使い，温度変化に伴う R_t〔kΩ〕の変化を V_0〔kV〕の変化として取り出す方法である。

(2) 光センサ

光センサには，光によって抵抗値が大きく変わる半導体や，光によって電気を生じる半導体がよく使われる。

電動機の回転速度を測定するために，従来は，電動機の回転軸に小形の発電機を備え付け，その誘導電圧から，回転速度を測定する方法が使われてきた。最近では，ホトトランジスタを光センサとして使い，非接触で，しかも数十万〔rpm〕まで測定できる回転計が使われるようになった。

図7において，回転計のランプから出た光は，反射テープで反射され，ホトトランジスタで電気信号に変換される。これを増幅して

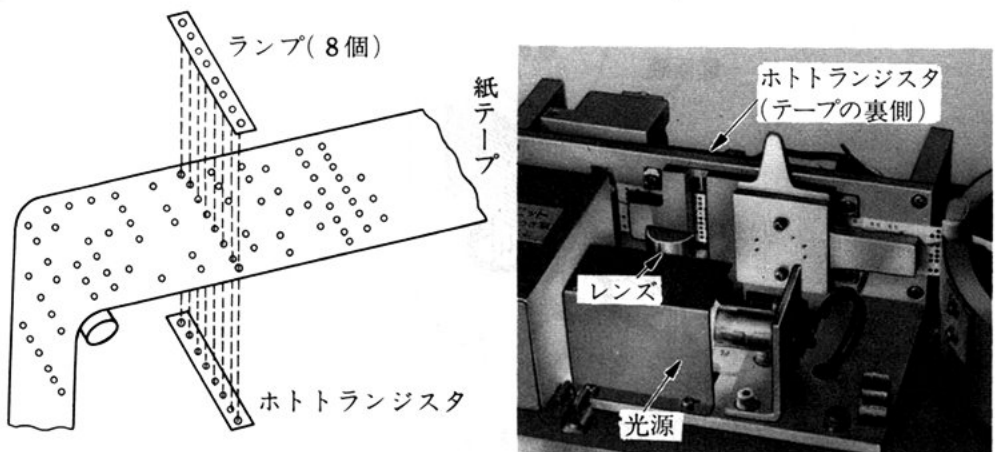
図8 ホトトランジスタによる紙テープリーダ

波形整形し，単安定マルチバイブレータにより，適当なパルス幅にして，出力回路を駆動し，回転速度を計器に表示する。この方式の大きな特徴は，表示の方法がディジタル化しやすいことである。

図8は，電子計算機における紙テープリーダの一例である。8個のランプにより，紙テープ上にせん孔されている孔(あな)の有無を，ホトトランジスタで検出するものである。

以上のような応用例のほかに，光ファイバの両端に，発光ダイオードとホトトランジスタを配置することによって，光を使った良好な情報伝送も行われるようになってきた。

(3) 湿度センサ

湿度センサは，細かい孔が分布している金属酸化物セラミックの抵抗値が，孔に水分が付着すると導電性が良くなり，抵抗値が下がるということを利用したものである。

図9は湿度センサの構造である。湿度を検知するための感湿セラミックのまわりを囲んでいるヒータは，センサ表面の汚れをとるための加熱クリーニングヒータで，センサ表面を400〔°C〕ぐらいに

図 9　湿度センサの構造

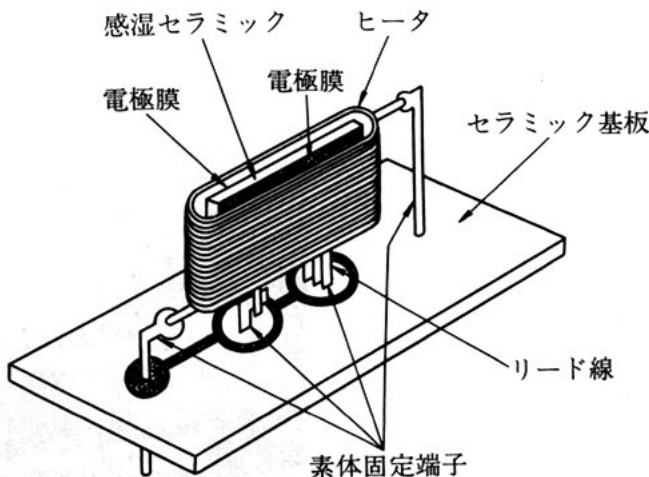
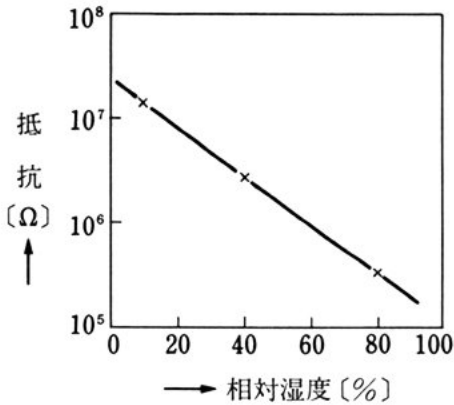



図 10　湿度センサの特性

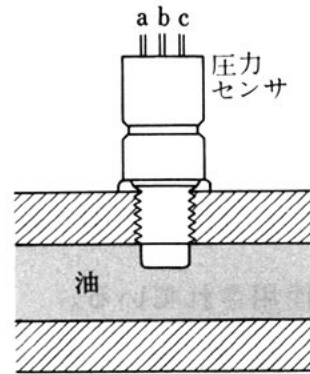



図 11　ねじ込み圧力センサ

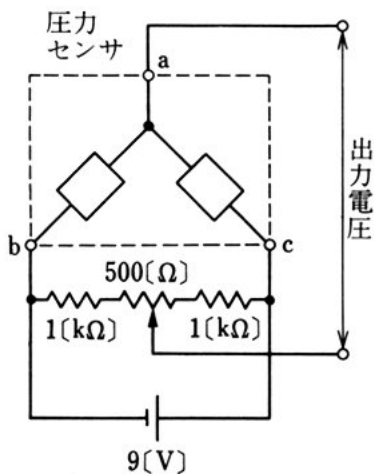
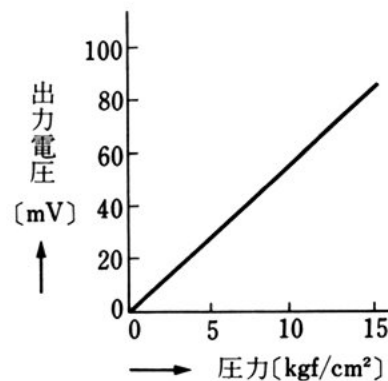
加熱することができる。

湿度センサの特性を図10に示す。湿度が増すと，湿度センサの抵抗値は図のように小さくなる。

湿度センサは，現在クーラー・電子レンジ・医用関係によく使われている。

(4) 圧力センサ

圧力センサには，いろいろな方式のものがある。図11に示す例

図 12　圧力センサの回路と出力電圧の圧力特性

(a)

(b)

は，半導体に圧力を加えると抵抗値が変わるという性質を利用したもので，ねじ込み式で取り付けるようになっている。図12(a)は，この圧力センサを使用するときの回路であり，図(b)は，その出力電圧の圧力特性である。

圧力センサは，油圧・空気圧および血圧の測定など，いろいろな方面で使用されている。

(5) 磁気センサ

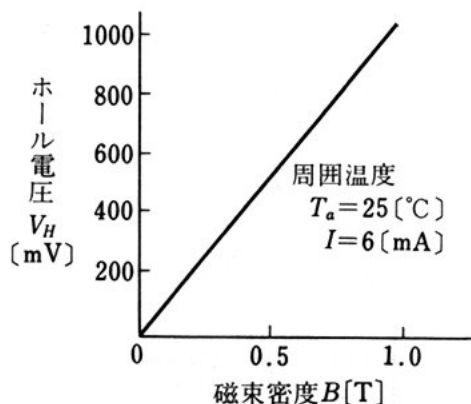
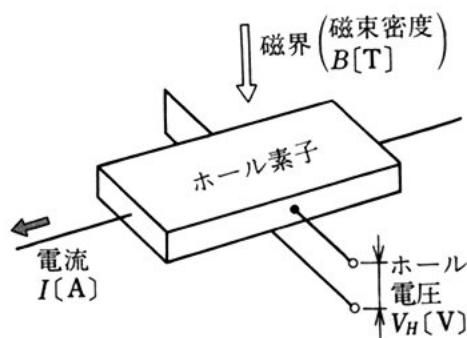
GaAs, InSbなどのホール素子とよばれるものが，磁気センサとして，よく使われている。

図13に示すように，ホール素子に電流I〔A〕と磁束密度B〔T〕の磁界を，互いに垂直な向きに加えると，両方に垂直な向きにIおよびBに比例する電圧V_H〔V〕が発生する。この現象を**ホール効果**という。この電圧を**ホール電圧**といい，次の式で示される。

$$V_H = R_H IB \quad (\text{比例定数 } R_H\text{: ホール定数})$$

図14は，ホール素子の特性例である。

図13 ホール効果の原理

図14 ホール素子の特性例

(6) 放射線センサ

放射線測定装置　**放射線**とは，電離作用をもった高エネルギーの粒子線または電磁波のことである。具体的には，表2のような種類がある。また，放射線は，図15のように透過性が強く，径路にある物質を電離する。そのため人体に有害な影響を及ぼすので，放射線の取り扱いには，じゅうぶん注意しなければならない。

放射線測定装置はいろいろあるが，どの装置も，放射線の径路にある物質を電離する性質を利用したものである。

GM計数管（ガイガー・ミュラー計数管）　図16にGM計数管の構造を示す。円筒形ガラスの内面に導電性物質を蒸着し，これを陰極とする。中心部には，ふつうタングステンで作った陽極を配置し，両電極間に千数百ボルトの高電圧を加える。電離気体として，アルゴン（Ar）あるいはネオン（Ne）ガスを封入する。放射線が入射するとガスが電離され，放電が生じるが，連続放電が生じないように，塩素・臭素・よう素などのガスを少量添加する。このようにしておくと，放射線が入射するたびに放電が生じ，そのたびにA, B端子の電圧が下がるので，これを計数することができる。

GM計数管は，主としてβ線計測用，またはα線計測用として

表 2　放射線の種類

放射線	
粒子線	電磁波
α 線（陽子2 中性子2）	γ 線
β 線（電子）	X 線
中性子線	
宇宙線	
その他	

図 15　放射線の透過度

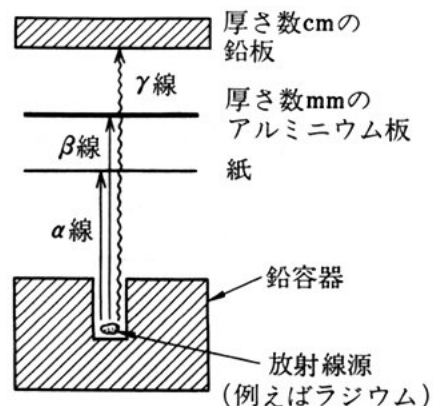
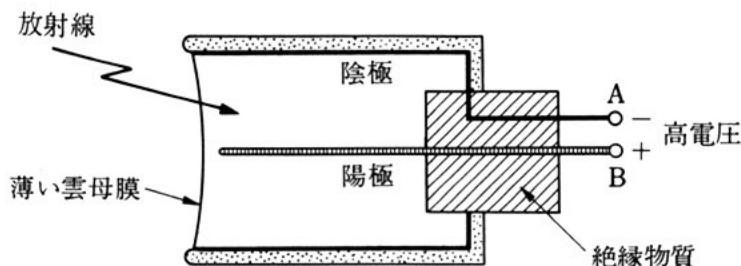
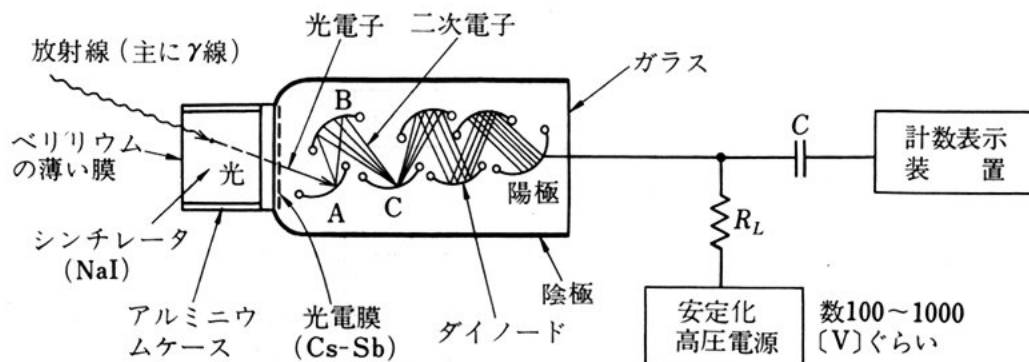



図 16　GM 計数管の構造

使用される。

シンチレーション計数管　図 17 に，シンチレーション計数管の構造を示す。シンチレータ（けい光物質）に放射線が入射すると，そのたびに，光量子が発生し，それが光電膜に当たると，光電子が生じる。この光電子は，正の電圧を加えた二次電子倍増電極，すなわち**ダイノード** A にぶつかり，二つ以上の二次電子を生じる。この一つ一つの電子は，ダイノード A より高い電圧を加えたダイノード B にぶつかり，二つ以上の二次電子をはじきだす。ダイノードの数は，ふつう 10 電極であり，最後の電極で電子を集めると，出力電圧が計数できる程度の大きさになる。

このパルス性の電圧を計数装置で計数する。なお，二次電子を生じさせる部分を **二次電子倍増管** という。

図 17　シンチレーション計数管の構造

シンチレータとしてNaIを使った計数管は，γ線に対して強いけい光を発するので，主にγ線計測用として使用される。

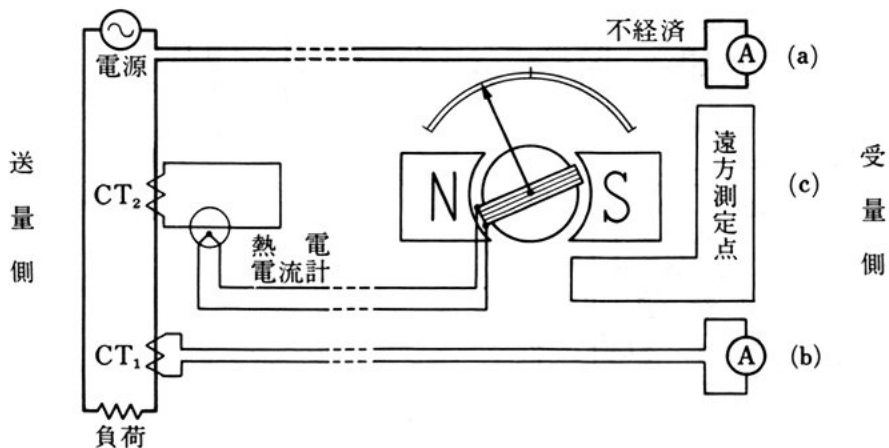
問 1. ダイノードに電子が1個が入射すると，二次電子が2個生じるとする。ダイノードが10個あると，電子1個の入射によって，最終的にはいくつの電子が生じるか。

3. 遠隔測定

遠方にある電気回路の電圧・電流などを直視・直読できれば，遠方監視または遠方制御ができるようになる。そのための遠隔測定の方法について調べる。

(1) 直　送　法

図18の太線で示す回路の電流を遠方で測定したいとき，図(a)のように，そこまで太い電線を配線するのは不経済である。そこで，図(b)のように，変流器CT_1を使って，電流を小さくして遠方に送る方法が考えられる。この場合，電線の断線による障害が問題になる。また，交流で送る場合には，誘導電圧による障害を避けるため，

図 18　直　送　法

シールド線を使う必要がある。

それに対して，図(c)のように，熱電電流計で測定電流に比例する直流電圧を作り，これを遠方測定点の受量側に送る方法が考えられる。このような方式は**サーマルコンバータ方式**とよばれる。

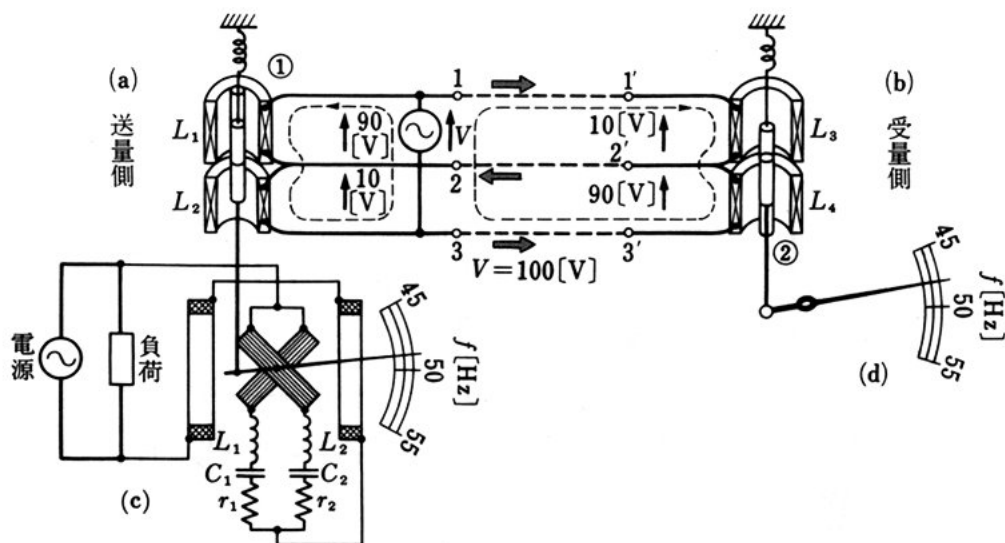
以上のように，測定量を電圧または電流に変換して，そのまま送る方法を**直送法**という。

問 2. 電圧測定の場合，受量側の電圧計はインピーダンスの大きなものを使う。なぜか。

(2) 位 置 平 衡 法

図19(a)，(b)のように，送量側と受量側に，上下2段のコイルを置き，3線結線を行って電圧 V〔V〕を加える。

この場合，送・受両側の鉄心が①，②の位置にあるとすれば，インダクタンス L_1, L_4〔H〕は大きいので，その両端の電圧は，例えば，90〔V〕というように大きく，インダクタンス L_2, L_3〔H〕は小さいので，例えば，10〔V〕というように小さい。それで，線路

図 19 位 置 平 衡 法

2, 2′ には，矢印の向きに電流が流れ，L_2, L_3 の電流は大きく，L_1, L_4 の電流は小さい。ここで，① が固定されていれば，L_3 の大きい電流によって，② は ① の位置まで引き上げられる。そのとき，1, 1′ 間と 2, 2′ 間の電圧は等しくなり，線路 2, 2′ には電流は流れない。

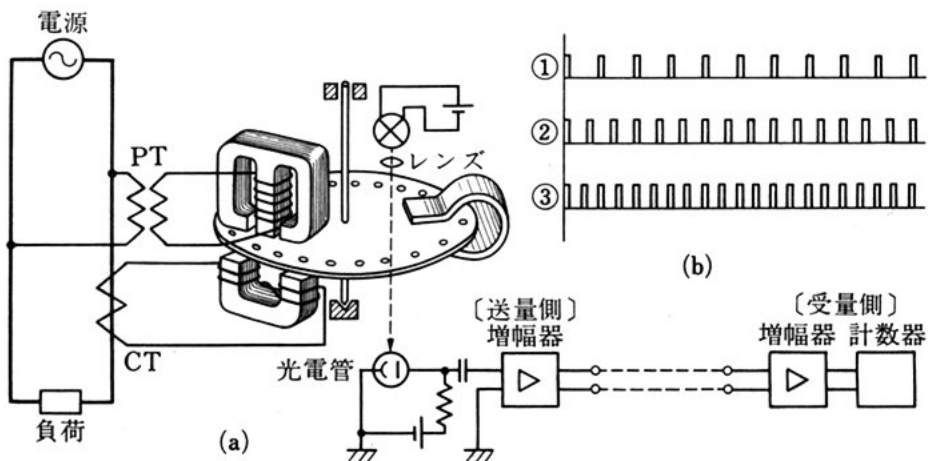
このしくみを利用して測定量を送る方法は，**位置平衡法** とよばれる。図 19 は，交流回路の周波数を送る方法を示す。

問 3. 図 19 において，①，② になんの力も働いていなければ，両方の鉄心は，どの位置で止まるか。

問 4. 図 19 で，線路 2, 2′ に電流が流れるのは，①, ② がどんな状態にあるときか。また，流れないのは，どんな状態にあるときか。

(3) 符 号 法

図 20 (a) のような，電力量計の円板の回転数は，回路の消費電力に比例している。それで，この円板に，図のように，小さな孔をあけておき，光源 L からの光を断続させて，光電管で受ける。光電管は，光が当たると，電子が飛び出す働きがあるので，これから，図 (b) のように，パルスが取り出される。回路の消費電力が大きく，円

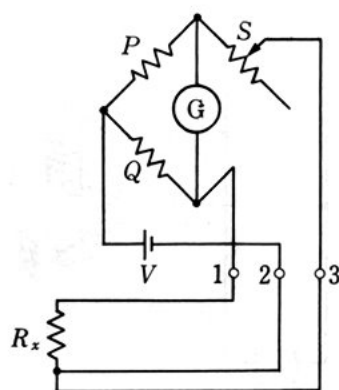
図 20 符 号 法

板が速く回ると，①，②，③のように，単位時間中のパルスの数は多くなる。受量側でこれを受け，単位時間中のパルスの数を計数器で数えると，電力を知ることができる。このような方法は**符号法**とよばれ，誘導妨害などの影響を受けない効果的な送量法である。

問 5. 図20(a)で，電力を送る場合と電力量を送る場合とでは，取り扱い方をどう変えればよいか。

問　　題

1. 熱電対を応用する回路について，すでに学んだものをすべて挙げ，さらに，いろいろ考えてみよ。
2. α 線と β 線はどのように違うか。
3. 遠隔測定の一つである符号法によって，ディジタル量を伝送する場合の特徴を述べよ。
4. 遠隔測定は，どのようなところに利用されているか。例を挙げよ。
5. 温度の測定法について，次の問いに答えよ。
   (1) 電気を利用しないもので，知っているものを挙げよ。
   (2) 電気を利用するもので，知っているものを挙げよ。
   (3) それらのおよその測定範囲について調べよ。
6. 図21は，温度測定器の例である。次の問いに答えよ。
   (1) 測定原理を説明せよ。
   (2) 端子2と3を直接接続しないで，端子1，2，3を接続してあるのはなぜか。

（ヒント：R_x から端子1，2，3までの抵抗をそれぞれ r とせよ。）

図 21

第7章
照　　明

電気照明の発達は，人々の生活を豊かにし，産業の発達を促し，文化の向上に役立っている。

この章では，照明についての測光量と，その単位などの基礎的な事項について調べ，次に，光源として利用されている電灯・けい光灯などと，その器具について調べ，さらに，照明設計の方法について考える。

5

オフィスの照明

照明の基礎

この節のねらい　電灯・けい光灯などを用いて，ある場所の照明を行う場合，電気に関する知識だけでは，じゅうぶんな計画・設計・施工はできない。それには，光に関するいろいろな測光量について，よく理解し，その定量的な取り扱いができなくてはならない。

ここでは，光に関する基本的な諸量と，その単位について調べ，その性質について考え，正しい取り扱いについて学ぶ。

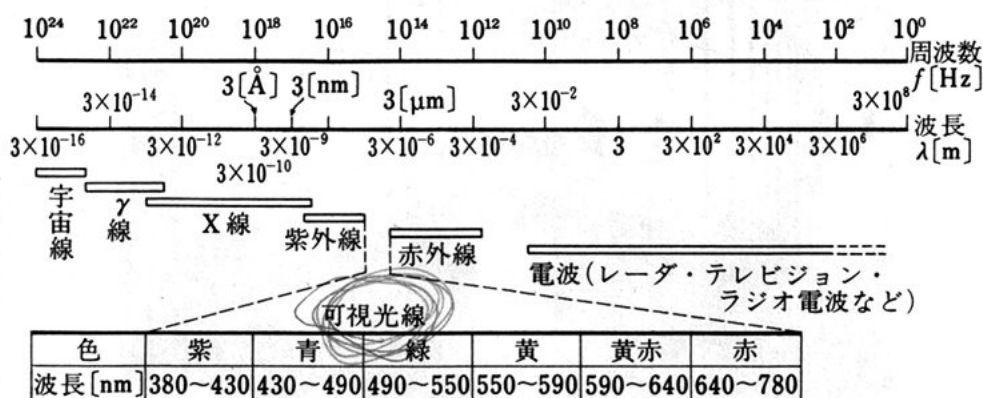
1. 光のエネルギー

(1) 光　の　色

家庭で使われている電灯やけい光灯を注意深く見ると，光の色は少し違っている。また，太陽光線をプリズムに当てて見ると，図1のような色が現れる。

光は，X線・紫外線・赤外線，ラジオの電波などと同じような電

図 1　電磁波のスペクトル

色	紫	青	緑	黄	黄赤	赤
波長〔nm〕	380～430	430～490	490～550	550～590	590～640	640～780

μm…マイクロメートル
nm…ナノメートル
Å…オングストローム

磁波として，空間を光速度(3×10^8〔m/s〕)で伝わる。このように，電磁波としてエネルギーが伝わる現象は，**放射**(radiation)とよばれる。図1の電磁波は，波長(または周波数)によって区別される。このように，波長の順に示されたものは，一般に**スペクトル**(spectrum)とよばれる。

問 1. $f\lambda=3\times10^8$〔m/s〕の式から，$\lambda=555$〔nm〕の周波数を求めよ。

問 2. 可視光線の波長は，どの程度か。

(2) 放射束と光束

図2のような電球のフィラメントに電流を流すと，電球からは，熱線・可視光線などの電磁波のエネルギーが放射される。この場合，放射される全波長のエネルギーは，単位時間に放射される量で表すと都合がよい。これを**放射束**という。放射束は ϕ で表し，単位には J/s すなわち W が用いられる。また，波長 λ〔m〕の放射束とは，波長 λ を含む単位波長当たりの放射束ということで，ϕ_λ〔W/m〕で表す。

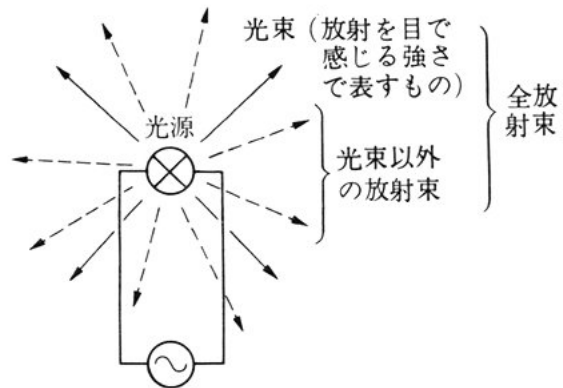



図2 電 灯 の 光

視感度　いろいろな波長の放射束のうち，380〜780〔nm〕の範囲の波長をもった電磁波が，可視光線すなわち光とよばれるものである。波長が異なると，目に感ずる光の色が異なる。また，合成された光に対しては，それぞれの波長と量に応じた光の色を感ずる。

また，光に感ずる目の性質として，波長によって，感ずる明るさが異なるという特性がある。この場合，光に対する目の感覚は，**視感度**

とよばれる。例えば，波長 λ〔m〕の放射束が ϕ_λ〔W/m〕で，光に感ずる量を F_λ とするとき，$K_\lambda=\dfrac{F_\lambda}{\phi_\lambda}$は，波長 λ のエネルギーを，どれだけの明るさに感ずるかということを表すもので，K_λ をその波長に対する視感度という。ここで，F_λ は，波長 λ の**光束**とよばれるもので，単位には**ルーメン**（lumen，単位記号 lm）が用いられる。

比視感度曲線　視感度は，黄緑色の 555〔nm〕の波長で最も大きく，その値は 680〔lm/W〕である。この値（最大視感度）を K_m とし，これを基準にとって，波長 λ の視感度 K_λ を，K_m で割った $V_\lambda=\dfrac{K_\lambda}{K_m}$ は，**比視感度**とよばれる。図3は，比視感度曲線である。

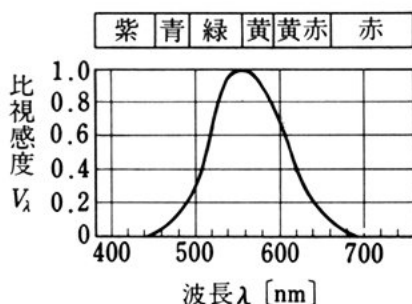



図3　比視感度特性

問 3.　555〔nm〕における視感度が 680〔lm/W〕であることから，図3を利用して，500〔nm〕における視感度を求めよ。

（3）　光　　度

どの向きにどれだけの光が出ているかを表すのに，**光度**という量が用いられる。

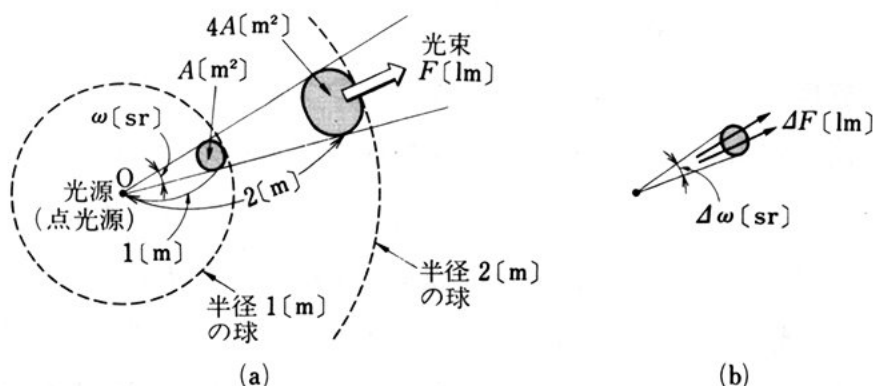



図4　立体角と光度

図4(a)のように，光源が一つの点とみなされるような場合には，**点光源**とよばれる。

立体角　図4(a)のように，点Oから見た空間の広がりの度合いを表すのに立体角を用いる。点Oを頂点とするすいを考える。すいの頂点Oを中心とする半径1〔m〕の球面上で，すい面の切り取る面積が A〔m²〕であるとき，このすい面が作る立体角の大きさを A **ステラジアン**(steradian，単位記号 sr)という。半径1〔m〕の球の表面積が 4π〔m²〕であるから，全立体角は 4π〔sr〕であり，図5の場合は，その $\frac{1}{8}$ 倍すなわち，$\frac{\pi}{2}$〔sr〕である。

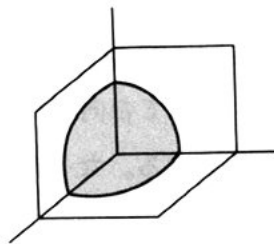
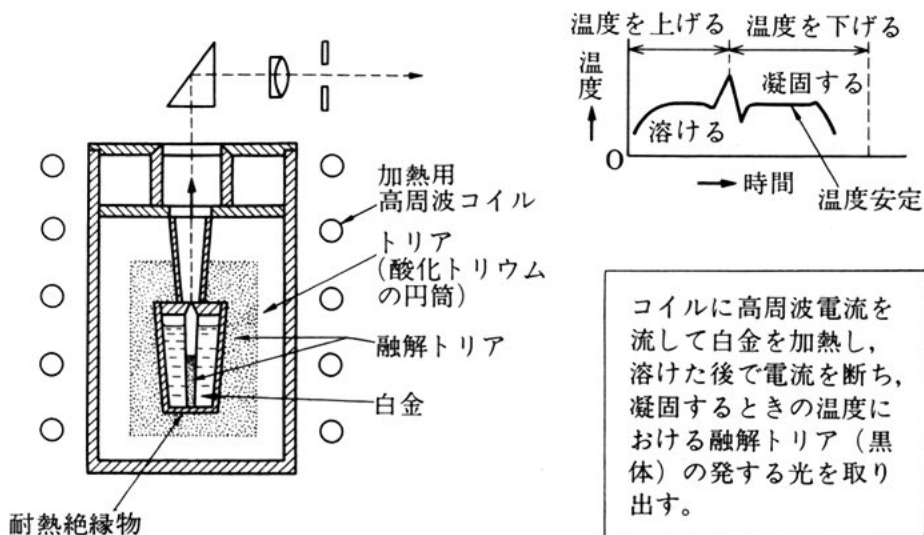



図5 立体角

光　度　一般に，光度は I で示され，単位には**カンデラ**(candela，単位記号 cd)が用いられる。図4(b)のように，光源の，ある向きに対して，立体角 $\Delta\omega$〔sr〕に，ΔF〔lm〕の光束が出ている場合，光

図6 光度の標準

コイルに高周波電流を流して白金を加熱し，溶けた後で電流を断ち，凝固するときの温度における融解トリア(黒体)の発する光を取り出す。

度 I〔cd〕は，次の式で示される。

$$I=\frac{\Delta F}{\Delta\omega} \qquad (1)$$

1〔cd〕は，白金の凝固温度（2043〔K〕）における黒体（p. 57 参照）1〔m²〕の平らな表面の，垂直な向きの光度の $\frac{1}{600000}$ 倍の大きさであると定められている。図6は，白金を用いた**光度標準器**の例である。

問 4. 図4(b)で，$\Delta F=1$〔lm〕，$\Delta\omega=0.01$〔sr〕のとき，I を求めよ。

問 5. すべての向きに対して，I〔cd〕の光源から出る全光束は，$4\pi I$〔lm〕である。なぜか。

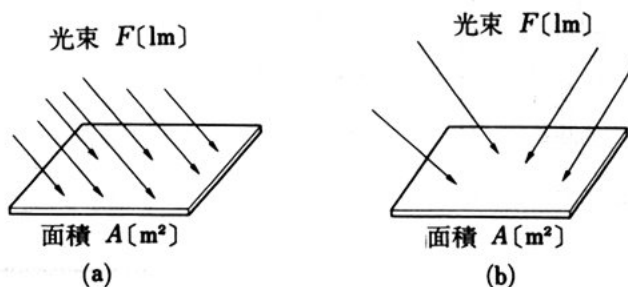
2. 点光源と照度

（1） 光束と照度

ある面の照らされる度合いは，その面の照度とよばれる。図7において，面積を A〔m²〕，一様に入射する光束を F〔lm〕とすると，単位面積当たりの入射光束 E は，次のようになる。

$$E=\frac{F}{A} \qquad (2)$$

この E を**照度**といい，単位には**ルクス**（lux，単位記号 lx）を用い

図7 照　度

る。すなわち，1〔m²〕の面を，1〔lm〕の光束で一様に照らしたとき，この面の照度は，1〔lx〕であるという。

問 6. 2〔m²〕に 2000〔lm〕の入射光束がある。照度を求めよ。

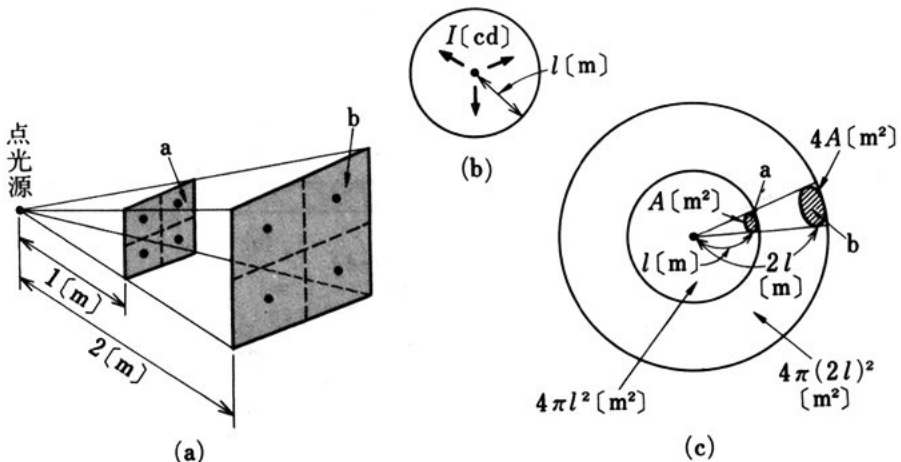
問 7. 光度と照度の違いを説明せよ。

（2） 距離の逆2乗の法則

図8(a)のように，点光源からの距離が大きくなるに従って，照らされる面は拡大するので，単位面積当たりの入射光束は小さくなり，照度は距離の2乗に反比例することがわかる。このことを，光度と照度の関係から考えてみよう。

図(b)において，点光源の光度を I〔cd〕とし，すべての向きに対して，一様な光度をもつものとする。そこで，点光源から l〔m〕離れた点の照度 E〔lx〕を求める。点光源から，すべての向きに放射される全光束 F は，$4\pi I$〔lm〕であり，球の表面積は $4\pi l^2$〔m²〕であるから，照度は次のようになる。

$$E=\frac{4\pi I}{4\pi l^2}=\frac{I}{l^2} \tag{3}$$

図 8　距離の逆2乗の法則

このことは，照度が距離の2乗に反比例していることを示す。

問 8． 図8(c)を用いて，距離が2倍になると，照度が$\frac{1}{4}$倍になることを説明せよ。

問 9． 光度100〔cd〕の点光源から，2〔m〕離れた点の照度を求めよ。

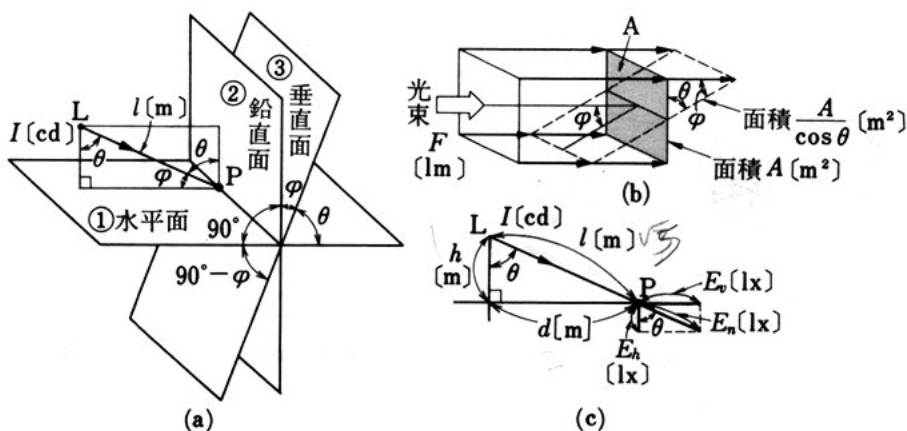
（3）　水平面照度・鉛直面照度

図9(a)において，点光源Lによって，点Pに生ずる照度を考えてみる。この場合，点Pにおける入射光束が入る面を，①のような水平面とするか，②のような鉛直面とするか，あるいは，③のような垂直面とするかによって，その照度は違ってくる。

法線照度　入射光束に垂直な面③に対する照度は，**法線照度**とよばれる。図(a)において，光源Lから点Pに向かう向きの光度をI〔cd〕，光源Lの点Pとの距離をl〔m〕とすると，法線照度E_n〔lx〕は，次のようになる。

$$E_n = \frac{I}{l^2} \qquad (4)$$

任意の面に対する照度　図9(a)の点Pにおけるきわめて小さい範囲を考えると，この範囲内では，Lからの光線は，ほぼ平行光

図 9　水平面・鉛直面・垂直面の照度

線と考えることができる。図(b)は，そのようすを示す。この場合，垂直面Aに対する照度は，$E_n=\dfrac{F}{A}$〔lx〕で示されるが，これとθの角をなす面に対しては，照度E〔lx〕は，次のようになる。

$$E=\frac{F}{\dfrac{A}{\cos\theta}}=\frac{F}{A}\cos\theta=E_n\cos\theta \qquad (5)$$

水平面照度と鉛直面照度　式（5）の考え方で，図9(a)の点Pにおける，水平面に対する照度（**水平面照度**）E_h〔lx〕および，鉛直面に対する照度（**鉛直面照度**）E_v〔lx〕を考えると，次のようになる。

$$\left.\begin{aligned} E_h&=\frac{I}{l^2}\cos\theta=E_n\cos\theta \\ E_v&=\frac{I}{l^2}\cos\varphi=\frac{I}{l^2}\sin\theta=E_n\sin\theta \end{aligned}\right\} \qquad (6)$$

式（6）から，E_n, E_h, E_vの間には，図(c)のような関係がなりたつ。

問 10.　図9(c)において，$I=100$〔cd〕，$h=1$〔m〕，$d=2$〔m〕であるという。E_n, E_h, E_vの値を求めよ。

問 11.　図10において，点Pの法線照度を求めよ。

問 12.　図11のような場合，点Pの水平面照度E_hは，L_1による水平面照度E_{h1}と，L_2による水平面照度E_{h2}との和として求められる。E_hを求めよ。

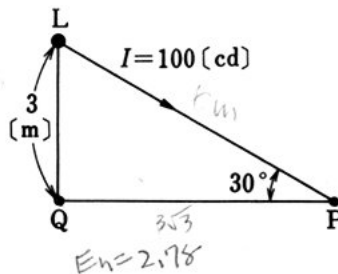
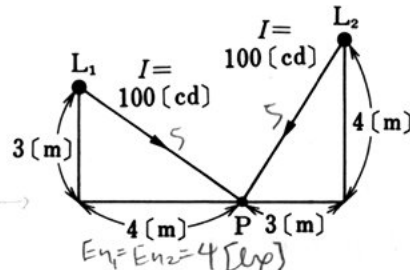



図 10　　図 11

3. 面光源と輝度

(1) 光束発散度

図12のように，光源がある大きさをもっている場合，光源の単位面積から発散される光束（光束の面積密度）の大きさを考えることができる。この光束の面積密度を**光束発散度**といい，その量をM〔lm/m²〕で表す。光束発散度が大きいほど，せまい面積からたくさんの光束が出ているということになる。

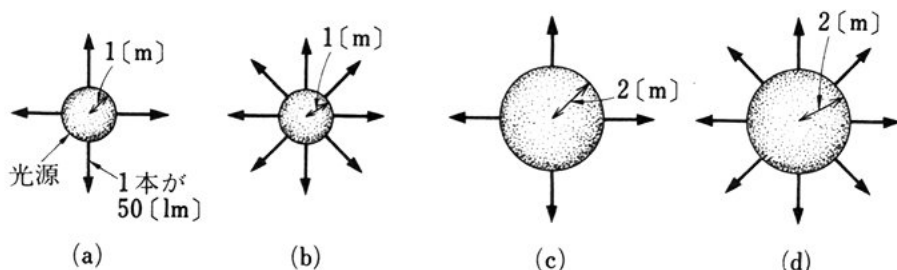



図12　光源の光束発散度

反射・吸収・透過　ガラスのような材料は，光をよく通す。図13において，入射光束をF〔lm〕，反射光束をF_1〔lm〕，透過光束をF_2〔lm〕とすれば，一般に，$F-F_1-F_2$は0にはならない。この光束に相当する量は，材料の中で熱エネルギーなどに変わって吸収され，消費される。吸収される光束をF_3〔lm〕とすれば，次の式がなりたつ。

$$F=F_1+F_2+F_3 \qquad (7)$$

ここで，$\dfrac{F_1}{F}$を**反射率**，$\dfrac{F_2}{F}$を**透過率**，$\dfrac{F_3}{F}$を**吸収率**といい，それぞれをρ, τ, σで表す。ρ, τ, σの間には，次の関係がある。

$$\rho+\tau+\sigma=1 \qquad (8)$$

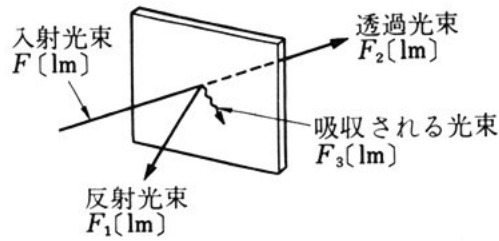



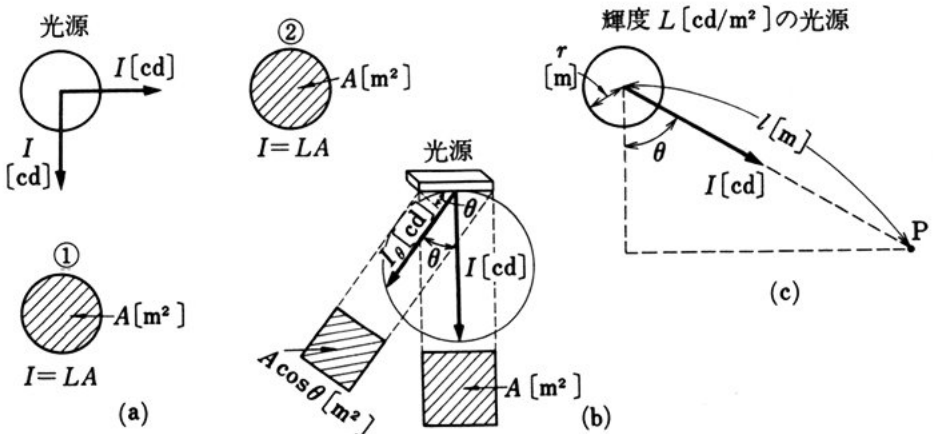
図 13　反射・吸収・透過

問 13.　図 12 (a), (b), (c), (d) において，矢印 1 本は 50〔lm〕であって，その合計の光束が球の表面から一様に出ていると考える。各光源の光束発散度を求めよ。

（2）輝　　度

図 14 (a) のように，一様に輝く球形の光源について考えてみる。この場合，①，② などのどの向きに対しても，I〔cd〕の光度があると考えられ，光源の見掛けの面積（光源のその向きに対する正射影）A〔m²〕は等しいと考えられる。

この場合，光度 I と A の比は，光源の見掛けの単位面積当たりの光度であり，この値が大きければ，その光源はよく輝いていると考えることができる。$\dfrac{I}{A}$〔cd/m²〕は **輝度** とよばれ，L〔cd/m²〕で

図 14　輝 度 と 光 度

表される。なお，1〔cd/cm²〕は1**スチルブ**（stilb，単位記号 sb）とよばれることもある。

輝度一定の図(b)のような板状光源があるとき，見掛けの面積は，角度 θ によって異なり，$A\cos\theta$ で表される。それで，最大光度（法線の向きの光度）を I とすると，角度 θ の向きに対する光度 I_θ〔cd〕は，次のようになる。

$$I_\theta = I\cos\theta \qquad (9)$$

問 14. 図14(c)の，点Pの水平面照度 E_h〔lx〕は，$E_h=\dfrac{I}{l^2}\cos\theta$ で示されることを説明せよ。

問　　題

1. 黄色の光の波長は，何ナノメートルか。また，この振動数をテラヘルツ（1〔THz〕$=10^{12}$〔Hz〕）でいえ。

2. 200〔m²〕の面積に，300000〔lm〕の光が入射しているという。照度はいくらか。

3. 200〔cd〕の点光源から，1.5〔m〕離れた点の照度を求めよ。

4. 一般に，法線照度 E_n〔lx〕，水平面照度 E_h〔lx〕，鉛直面照度 E_v〔lx〕の間には，どんな関係があるか。

5. 次の単位は何の単位か。

(1) cd/m²　(2) lm/m²　(3) lx　(4) cd

6. 次の用語を説明せよ。

(1) 比視感度　(2) 光束発散度

2 電　灯

この節のねらい　物体を高温にすると光を放射する。この考え方を実現したのが電灯である。電灯を実際の照明に用いるときには，いろいろな器具が使用される。

ここでは，高温物体の放射する放射エネルギーについて調べ，電灯の構造・特性について考える。また，光束・光度などの測定法について調べ，電灯を効果的に利用する方法について考える。

1. 温度放射

(1) 黒　体

電球や太陽を見てもわかるように，高温の物体はエネルギーを放射する。一般に，温度が高くなって，まわりにエネルギーを放射することを**温度放射**という。

温度放射による放射エネルギーの量は，物体の温度が高いほど大きく，物体の表面積が広いほど大きい。また，物体の吸収率が大きいほど大きい。

吸収率 100〔%〕の物体を**黒体** (black body) という。黒体は実在しないが，油煙・白金黒などは，これに近い性質をもっている。

問 1. 黒体に光を当てたとすると，どのように見えるか。

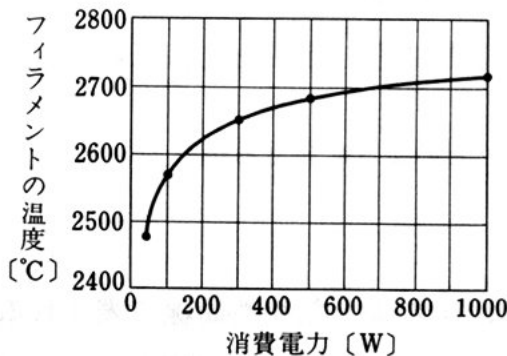
(2) 色　温　度

黒体からの放射エネルギーは，図1のような特性曲線で表される。横軸は波長 λ〔nm〕で示されている。縦軸に示す P_λ〔W/(m²·μm)〕

は，波長 λ における単位面積当たりの放射束である。図からわかるように，黒体の温度をしだいに上げていくと，放射束の波長成分の分布状態が変わり，温度によって最もよく放射されるエネルギーの波長が変わり，放つ光の色が変わってくる。したがって，光の色がわかれば，温度を知ることができる。一般に，高温物体の温度を表すのに，それと同じ色の光を放つ黒体の温度で表す方法がある。これを**色温度**という。色温度は，一般の光源の色を表すのにも用いられる。

図 1　いろいろな温度の物体の放射エネルギーと波長の関係

問 2.　図2では，電球の消費電力が大きいほど，フィラメントの温度が高い。温度が高いと，どんな利点があるか。

図 2　電球の種類と温度

電球のフィラメントの温度

電球の種類	温度〔℃〕
40 W 形	2475
60 W 形	2500
100 W 形	2575
200 W 形	2620
300 W 形	2665
500 W 形	2670
1000 W 形	2720
1500 W 形	2765

（照明学会編「照明のマニュアル」による）

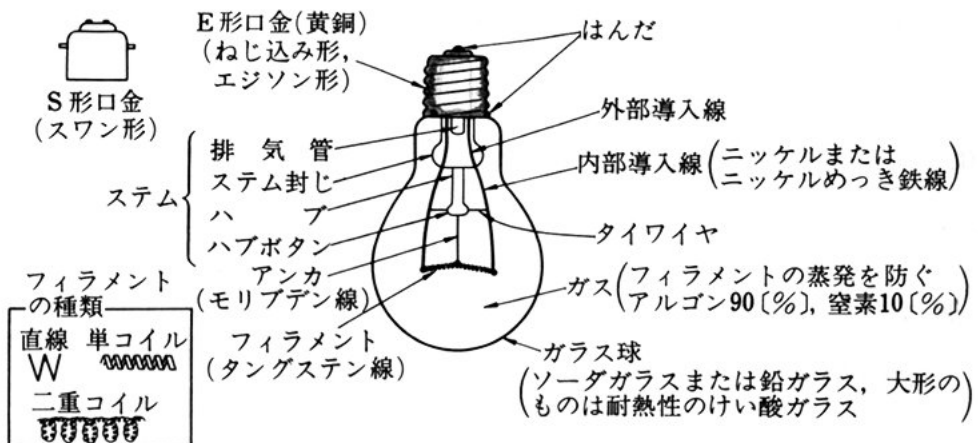
2. 電　　球

(1) 電球の構造

抵抗線（フィラメント）に電流を流すと発熱し，高温となって温度放射を行い，光を放つ。この場合，フィラメントの温度が高いほどよく放射する。ところで，空気中でフィラメントを高温にすると，空気中の酸素によって酸化焼断するので，真空の球の中にフィラメントを封じ込んで利用することが考えられた。

図3は，電球の構造の例である。

ガラス球の内部は，真空ポンプで 10^{-4}〔mmHg〕* 程度まで排気される。また，真空度をいっそう上げるため，あらかじめゲッタ（りん・バリウムなどを成分としたもの）をフィラメントに塗っておき，排気後，フィラメントを加熱してゲッタを蒸発させ，残留酸素と化合させる。なお，真空にしておくと，点灯時に，フィラメントの蒸発が著しくなるので，真空にした後，不活性ガスを封入したものもある。

図3 電　　球

* $1〔mmHg〕= \frac{1}{760}〔atm〕= 133.322〔Pa〕$

問 3.　図3を見て，各部の構造を説明せよ。

問 4.　二重コイルフィラメントの特徴を調べよ。

（2）　タングステン電球の性質

排気（さらにガス封入）後，電球に電圧を加えると，光束・電流が急激に変わり，その後一定になる。これは，線引きされたタングステンの結晶構造が，安定な状態に移るためである。それで，製造の最終段階において，過電圧で短時間点灯し，特性を安定させる。その操作は，**枯らし**または**エージング**とよばれる。

電圧特性　フィラメントの電圧 V を変えたとき，光束・電力・効率・寿命がどのように変わるかを調べると，図4のようになる。ここで，V_0 は，電球に定められた定格電圧であり，そのときの光束・電力・電流・効率・寿命は，F_0, P_0, I_0, η_0, L_0 で示されている。

また，効率は，光束と消費電力の比で表され，その単位は lm/W である。一般に，寿命は，フィラメントが切れるまでの点灯時間をいう。寿命 L_0 は，最も経済的に決められた値である。

この特性からわかるように，P, η, F は V が増すと増加し，寿命 L は低下する。

表1に，一般照明用100〔V〕電球の特性を示す。

問 5.　LF 100V 100W の電球の光束・効率はいくらか。

図4　電球の特性

(b) 電圧特性

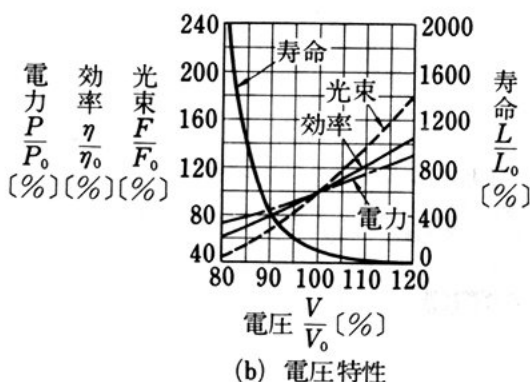
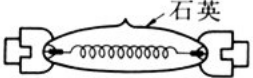



表 1　一般照明用 100〔V〕電球の特性

形　式	定格電圧〔V〕	定格消費電力〔W〕	定格初光束〔lm〕	寿　命〔h〕
L_W 100 V 20 W	100	20	170	1500
L_W 100 V 40 W	100	40	485	1000
L_W 100 V 100 W	100	100	1520	1000
L 100 V 20 W	100	20	175	1500
L 100 V 40 W	100	40	510	1000
L 100 V 100 W	100	100	1600	1000
L 100 V 200 W	100	200	3450	1000
L_F 100 V 20 W	100	20	175	1500
L_F 100 V 40 W	100	40	510	1000
L_F 100 V 60 W	100	60	850	1000
L_F 100 V 100 W	100	100	1600	1000
L_F 100 V 200 W	100	200	3450	1000

（JIS C 7501−1983 による）

注．L_W：白色塗装　L：無色透明　L_F：内面つや消し

表 2　各 種 の 電 球

	投光器用電球の例	反射形投光電球の例	ハロゲン電球の例
形　式	PR 100 V 1500 W	RS 100 V 500 WH	J 100 V 500 W
消費電力	1500±105〔W〕	定格 500〔W〕	500±40〔W〕
光　束	28500±4300〔lm〕	ビーム光束 1600〔lm〕	10500±1500〔lm〕
効　率	19.0±2.3〔lm/W〕	最大光度 9000〔cd〕	21〔lm/W〕
寿　命	1500〔h〕	2000〔h〕	2000〔h〕
			石英 水平に点灯し，管の各部 250～1200〔℃〕，封じ部 350〔℃〕以下で使用する。

（JIS C 7512−1977, JIS C 7525−1984, JIS C 7527−1984 による）

（3） 各 種 の 電 球

電球には，表 1 の一般照明用のほかに，表 2 の各種の電球がある。

投光器用電球　運動場・野球場などに用いられている電球で，大きな光束を得るために，消費電力の大きなものがある。

5　**反射形投光電球**　ガラス球の内面にアルミニウムの反射面をつ

け，特定の向きに光のビーム（集中光束）が発射できるようにしたもので，投光用に用いられる。図のものでは，ビーム角は 30° になっていて，光束は 1800〔lm〕であり，光度は 11000〔cd〕にも達する。

ハロゲン電球　電球の封入ガスとして，よう素・臭素などのハロゲン元素，またはそれらの化合物を封入したものである。ハロゲン元素は，温度が低くなるとタングステンと化合し，高くなると分解するので，蒸発したタングステンが管壁に蒸着するのを防ぐ働きをする。したがって，管壁が黒化せず，寿命がくるまで光束が変わらない。

問 6.　配電盤用電球（JIS C 7516）について調べよ。

3. 測　光

(1) 光度の測定

光度の測定においては，図 5 (a) のような**長形**（ながかた）**光度計**が用いられる。この図で，標準電球 L_s（光度 I_s〔cd〕）からの光と，光度のわからない電球 L（光度 I〔cd〕）からの光が，測光器 P の，a, b 両側に到達するが，それらの照度が等しくなるように，r_s〔m〕または r〔m〕を調節する。このようにすると，次の式がなりたつ。

$$\frac{I_s}{r_s^2}=\frac{I}{r^2} \qquad \therefore \quad I=I_s\left(\frac{r}{r_s}\right)^2 \qquad (1)$$

式（1）で，I_s がわかっており，r_s, r が測定できるとすれば，電球 L の光度 I の値を求めることができる。

標準電球　この測定で，標準電球 I_s が正しい値のものでなくてはならない。図 5 (b) は，標準電球の例である。これは，p. 49 で調べた白金を用いた光度標準器（一次標準器）によって，式（1）の考え

(a) 長形光度計

(b) 標準電球

(c) 測光器頭部

(d) ルンマ-ブロジュン立方体(対比形)

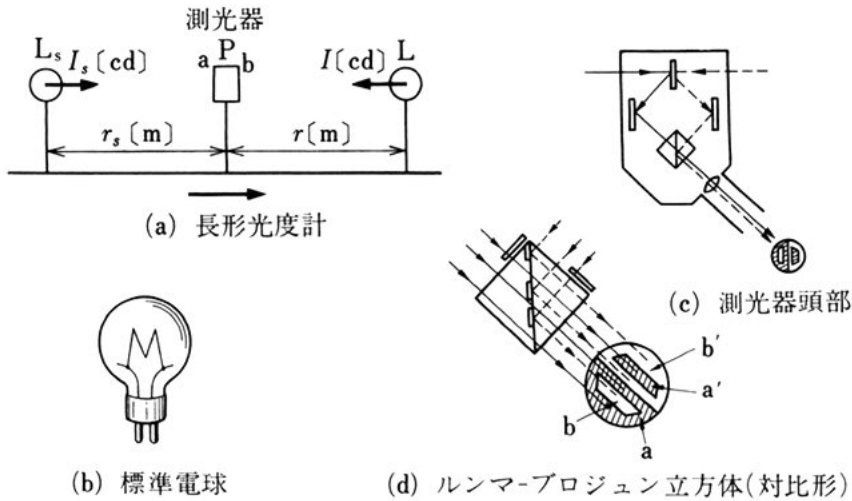



図5 光度の測定

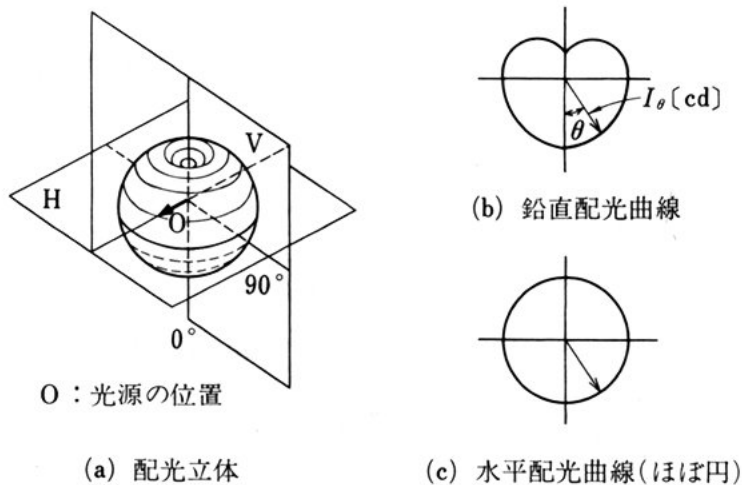
方で校正されたものである。標準電球は，二次標準器として用いられる。

測光器頭部　左右の光による照度を比較するための測光器には，図(c), (d)のようなものが用いられる。これを**ルンマ-ブロジュン立方体**という。a, a′, b, b′ の輝度が等しいときに，左右の光の照度が一致しているわけで，かなり感度の良い装置である。

図6 配光曲線

(a) 配光立体

(b) 鉛直配光曲線

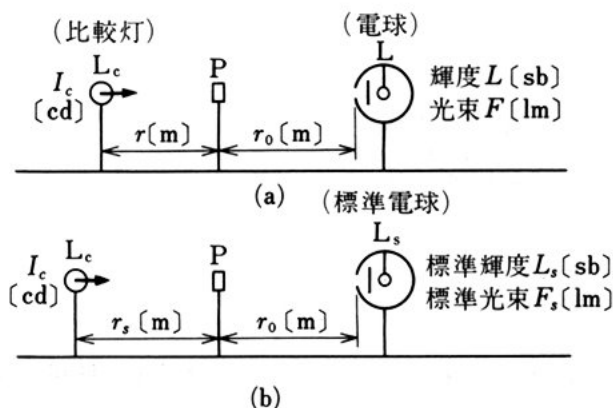
(c) 水平配光曲線(ほぼ円)

問 7.　図5(a)で，$I_s=50$〔cd〕，$r_s=1$〔m〕，$r=1.5$〔m〕のとき，電球 L の照度 I を求めよ。

配光曲線　光源のそれぞれの向きの光度分布を**配光**といい，図6(a)のように，これを立体的に示したものを**配光立体**という。この配光立体を平面 V で切って，曲線で示したもの（図(b)）を**鉛直配光曲線**といい，平面 H で切って，曲線で示したもの（図(c)）を**水平配光曲線**という。配光曲線は，光源や照明器具の光度分布の特性を表すのによく用いられる。

（2） 光 束 の 測 定

図7は，光束計による光束測定の方法を示す。まず，比較灯 L_c を調節し，光束のわからない電球 L からの光と L_c からの光を点 P で比較して一致させる。このとき，L_c と P の間隔を r〔m〕とする。次に，電球 L を標準電球 L_s と取り換え，再び L_c の位置を調節して，P の左右からの照度が一致するようにする。その場合，次の式がなりたつ。

$$\frac{F}{F_s}=\frac{L}{L_s}=\frac{\dfrac{I_c}{r^2}}{\dfrac{I_c}{r_s^{\,2}}}=\left(\frac{r_s}{r}\right)^2 \qquad \therefore \quad F=\left(\frac{r_s}{r}\right)^2 F_s \quad (2)$$

図 7　光束計による光束の測定

したがって，r, r_s, F_s がわかれば，F を求めることができる。

問 8. 図7において，$F_s=2000$〔lm〕，$r=1.5$〔m〕，$r_s=2$〔m〕であるという。電球Lの光束 F を求めよ。

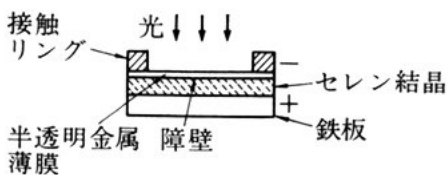
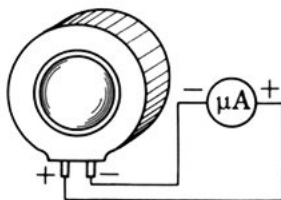
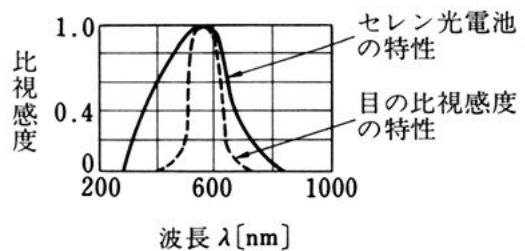
（3） 照 度 の 測 定

照度を測定する方法はいろいろあるが，図8(a), (b)のようなセレン光電池を用いた照度計が，かなり利用されている。**セレン光電池**は，図(a)のような構造になっていて，図(b)のように，マイクロアンペア計をつなぐことによって，光度または照度を測定することができる。セレン光電池の感度は，0.1～0.5〔mA/lm〕である。

ところで，このような光電池の波長の特性を調べると，図9のようになり，目の比視感度特性とはかなり異なっている。それで，セレン光電池の前部に，選択性のフィルタをおき，総合的に目の特性に近づける工夫がなされている。

問 9. 光電池照度計について調べ，照度測定範囲を変える方法について考えてみよ。

図 8　セレン光電池

図 9　セレン光電池の特性

問　　題

1. 二重コイル電球（一般照明用 100〔V〕, 100〔W〕）について，次の問いに答えよ。

(1) 真空にしてあるのはなぜか。また，ガスを封入してあるものがあるのはなぜか。

(2) フィラメントには，どんな材料が用いられているか。

(3) その融点は何度か。

(4) 点灯時におけるフィラメントの温度は，どの程度か。

2. 電球の効率は，一般に，図10のように，消費電力が大きいほど高い。その理由を説明せよ。

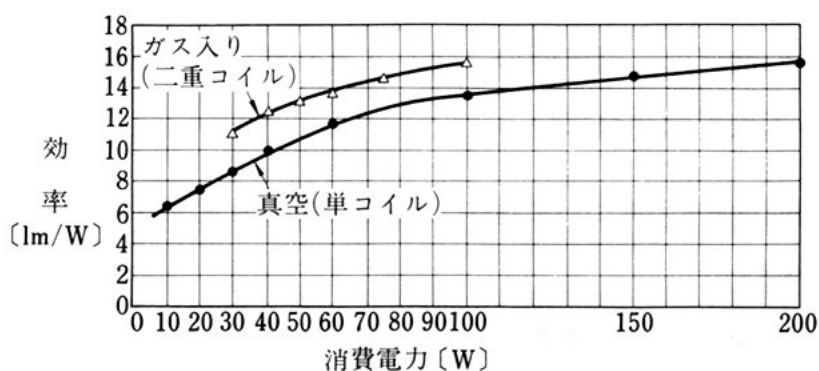



図 10

3. ガラスの透過率は約0.9，反射率は約0.1であるという。どうしたら確かめられるか。

放　電　灯

この節のねらい　二つの電極間に高圧を加え，放電させると，光を放射する。この考え方を電気回路を用いて実現したものが，放電灯とよばれるものである。放電灯には，一般家庭に広く用いられているけい光灯のほか，各種のものがあり，これらを実際の照明に用いる場合には，いろいろな器具が用いられる。

ここでは，主として放電による光について調べ，けい光灯・水銀灯などの構造・特性について考える。

1. けい光灯

(1) けい光ランプの原理と構造

けい光ランプは，図1(a)のように，細い管状になっていて，その内部にけい光物質（タングステン酸カルシウムなど）が塗ってあり，両端にフィラメントおよび補助電極が封じてある。管内には少量の水銀のほか，アルゴンなどが封入されている。

フィラメントが加熱されると，それから電子が放出される。それと同時に，水銀は蒸気となり，その圧力は0.01〔mmHg〕となる。電子は，水銀蒸気に衝突し，水銀原子の中にある電子をはじき出す(電離する)。また，水銀原子の電子が他の軌道に移り（励起し），それが元の軌道にもどるとき，紫外線（波長253.7〔nm〕）を放出する。紫外線はけい光物質に当たり，けい光物質を励起させ，けい光物質からは可視光線が放出される。

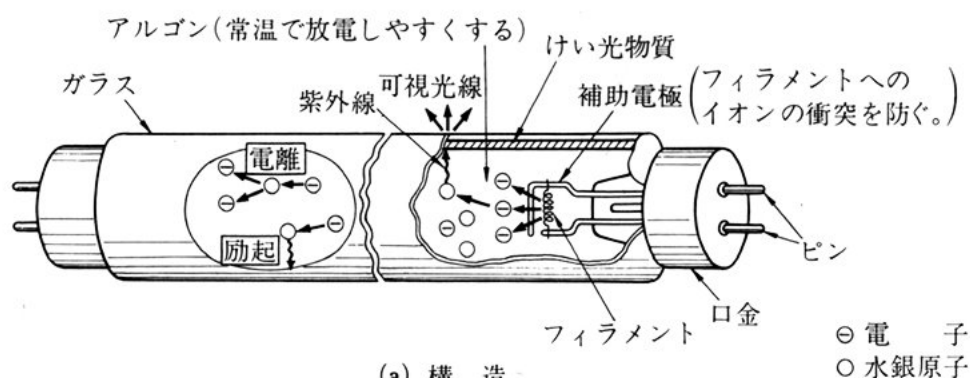
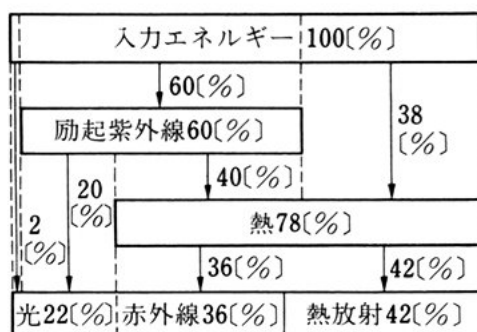
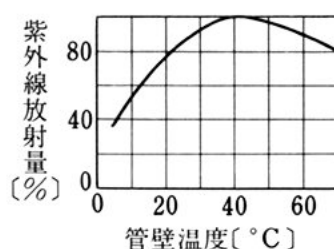
問 1. けい光ランプからの光の90〔%〕以上が，けい光物質からの光である。なぜか。

(a) 構　造

(b) 40〔W〕白色けい光ランプのエネルギー変換図

(c)

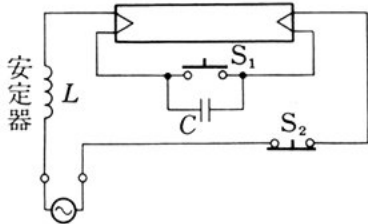
図1　けい光ランプ

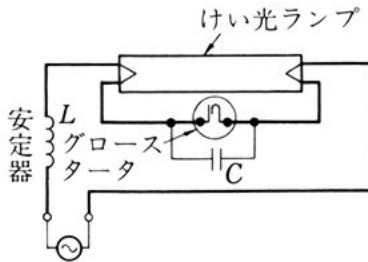
問2.　けい光ランプでは，入力エネルギーの何パーセントが光に変わるか。

問3.　冬の夜はけい光ランプが点灯しにくい。図1(c)からその理由を考えよ。

（2）　けい光灯の回路

図2(a)は，けい光ランプを点灯するための電気回路の例である。ここで，安定器は，けい光ランプを安定に点灯するためのコイルである。この図で，スイッチ S_1 を閉じると，けい光ランプのフィラメントに電流が流れ，加熱される。そのため，管内の水銀が蒸発する。S_1 を開くと，安定器に電圧が発生し，二つのフィララメントの間に高い電圧が加わり，放電する。

放電電流が流れると，安定器の電圧降下によって，二つのフィラ

(a) マニュアルスイッチ形

(b) グロースタータ

(c) グロースタート形

ア) 電圧が加わると，グロースタータが放電する。

イ) グロースタータ内の発熱によってバイメタルが伸び，固定電極と接触する。

ウ) 放電管のフィラメントに電流が流れ，管内の温度が上昇し，水銀蒸気が発生する。

エ) グロースタータ内の温度低下により，バイメタルが元の状態にもどる。

オ) フィラメント回路が断たれた瞬間，安定器に電圧が生じ，それでけい光ランプが点灯する。

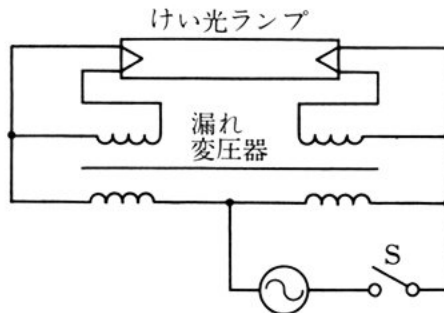
カ) 点灯後は，グロースタータに30〔V〕程度の電圧が加わっていて，グロースタータは放電しない。

図 2　けい光灯の予熱始動点灯回路

メントの間の電圧が低くなり，ランプに過大電流の流れるのを防ぎ，正常な放電が続けられる。

図(b),(c)は，グロースタータとそれを用いた点灯回路の例である。

図3はラピッドスタート形とよばれる始動方式をもったけい光ラ

図 3　ラピッドスタート点灯回路

ンプの点灯回路の例である。この回路では，安定器の代わりに漏れ変圧器が用いられる。ランプに始動電圧が加えられると同時に，電極予熱電圧が加えられ，1～2秒で点灯する。

問 4. 予熱始動形の特徴を述べよ。

（3） けい光ランプの特性と種類

けい光ランプは，点灯時間の経過とともに，けい光物質の劣化，電極物質の飛散による管壁の黒化などのために，光束が低下する。全光束 F と全光束の定格値 F_0 の比は，図4(a)のように，ある時間がたつと，かなり大きく低下する。その状態は，けい光ランプの形状，けい光物質の種類，電圧の大きさ，点灯条件などに支配される。

けい光ランプの明るさは，水銀蒸気圧に影響されるが，水銀蒸気圧は，管壁温度によって決まる。そのため，その光束は，図4(b)のように，管壁温度の影響を受ける。

表1は，各種のけい光ランプの規格の例を示す。

問 5. けい光ランプ FL 40 の初特性の全光束，および光束維持率が 85〔%〕のときの全光束はいくらか。

図 4　けい光ランプの特性

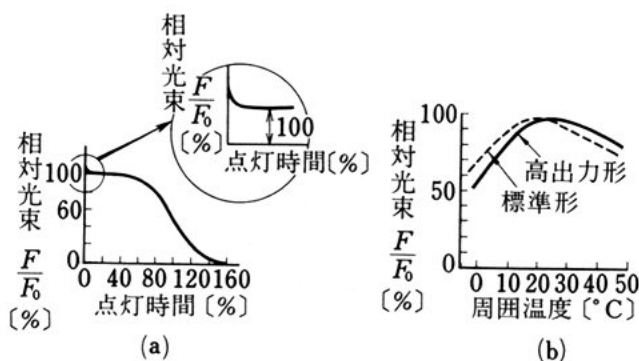



表 1　けい光ランプの規格例

種　別	定格電圧〔V〕	初　特　性			光束維持率〔%〕
		ランプ電流〔A〕	光 源 色	全 光 束〔lm〕	
FL 10	100	0.23	D	390	75 以上
			W	440	
FL 20	100	0.375	D	1010	85 以上
			W	1160	
FL 20 S		0.36	WW	1160	
FCL 30	100	0.61	D	1370	70 以上
			W	1580	
FCL 32	147	0.435	D	1690	70 以上
			W	1940	
FL 40	200	0.435	D	2610	85 以上
			W	3000	
FL 40 S		0.42	WW	3000	

FL：直管形　　FCL：環形　　FL, FCL の次の数値：定格消費電力
S：管形の細いもの　　D：昼光色　　W：白色　　WW：温白色
初特性は，定格電圧でランプを 100 時間点灯後の特性
光束維持率は，2000 時間点灯後の，全光束の初光束の初光束に対する比率
（JIS C 7601—1987 による）

光　色　けい光ランプから出る光の色は，けい光物質の種類によって，白・緑・青・桃・青白色のように，いろいろある。

一般照明用には，温白色，白色，昼光色の 3 種が用いられている。温白色は，また，色温度によって，3500〔K〕のものを WW-A，3000〔K〕のものを WW-B としている。温白色は，電球に似た温か味のある光色である。昼光色は，それより涼しい感じのするもので，色温度は 6500〔K〕である。

（4）効 率 と 輝 度

各種の光源の効率〔lm/W〕を比較してみると，けい光ランプは，白色光源として最も効率が良いと考えられる。ナトリウムランプとよばれるものは，効率はいっそう良いが，単色光であって，一般照

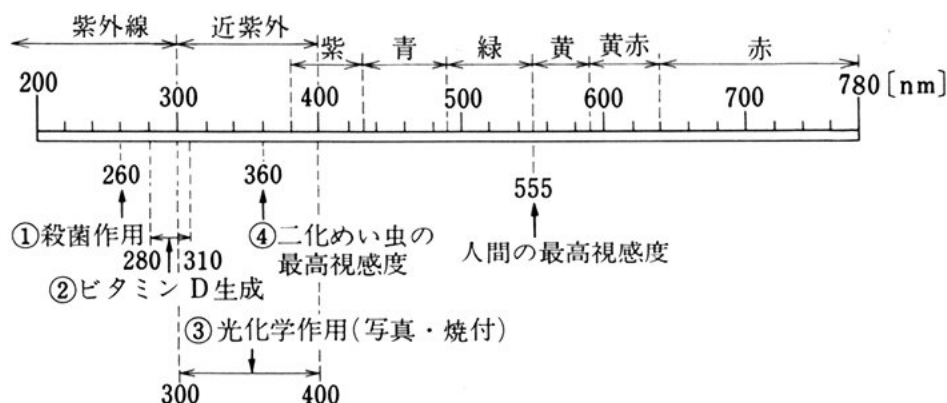



図5　光のスペクトル

明には適さない。けい光ランプは，効率の良い反面，発光面積が大きいので，電灯と比べて輝度は低い。

ちらつき　交流で点灯されるけい光ランプでは，半サイクルごとに電流の増減があるので，それに応じて光束が変化する。それで，これによって照らされた面の照度は増減し，ちらつきを感ずる。その程度は，けい光物質の残光性によって異なる。残光時間の長いものは，ちらつきも少ない。

問 6．　図5で，①，②，③，④はどんなところに利用されているか。

2. 水銀ランプ

(1) 水銀ランプの構造

ふつう水銀ランプとよばれるものは，高圧水銀ランプのことで，図6のような構造をしていて，発光管とよばれる石英製の筒に，放電のための二つの電極があり，さらに，補極があって，アルゴン・水銀などが封入してある。

外管は，ふつう透明なガラス製で，中に窒素ガスが封入してあり，発光管の保護・保温，内部金属部分の酸化防止，紫外線のしゃ断のために設けられている。

なお，外管には，その内面にけい光物質を塗ってあるものがあるが，これを**けい光水銀ランプ**という。また，外管の内面に反射面を作ってあるものを，**反射形水銀ランプ**という。

水銀ランプを点灯するには，図7のような電気回路を作る。スイッチを入れると，まず，主電極Aと補助電極Cの間に放電が起こり，続いて，主電極A, B間に放電が起こる。

問 7. 図7の安定器と補極抵抗の働きを述べよ。

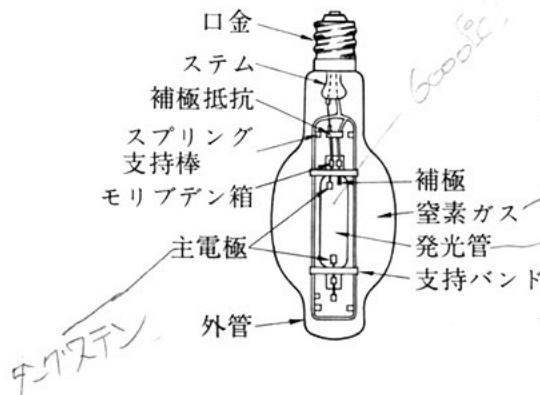
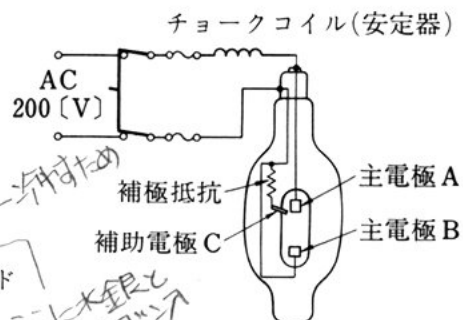
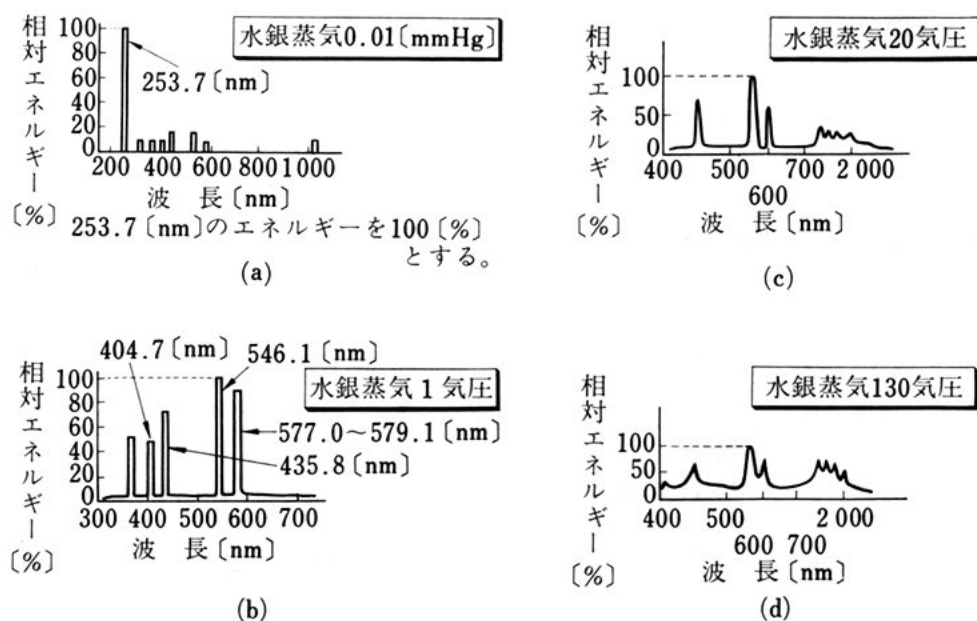



図 6　水銀ランプの構造例　……　**図 7　チョークコイルを用いた水銀ランプの代表的な点灯回路**

(2)　蒸気圧とスペクトル

真空の管の中に，アルゴンや水銀を入れ，電極を設けて電圧を加え，水銀蒸気の中で放電させると光を放射する。その光は，水銀蒸気圧が高い場合と，低い場合とでは，どのように異なるであろうか。

図8は，その光のスペクトルを示す。水銀蒸気圧が0.01〔mmHg〕というように低い場合には，図(a)のように，253.7〔nm〕のエネルギーがきわめて強い。蒸気圧を，1気圧，20気圧，130気圧というように，しだいに上げていくと，図(b)，(c)，(d)のように，圧力が高くなるに従って，可視光線が強くなる。

始動と蒸気圧　常温では，水銀蒸気圧は非常に低いので，放電開始を容易にするため，数〔mmHg〕のアルゴンが封入してある。放電を開始すると，水銀はしだいに蒸発し，適当な圧力となる。水銀ランプでは，水銀が，点灯中に全部蒸発するように調節してあり，けい光ランプでは0.01〔mmHg〕程度，高圧水銀ランプでは1～数

図8　水銀ランプの蒸気圧とスペクトル

図(b)～(d)は，546.1〔nm〕のエネルギーを100〔%〕とする。

気圧，超高圧水銀ランプでは10～200気圧になるようにしてある。

水銀ランプは，いちど消灯すると，すぐには再始動できない。その理由は，消灯直後は水銀蒸気圧が高く，そのため，放電を開始するのに必要な電圧（放電開始電圧）が高くなり，より高い電圧を加えなければ，放電が生じないからである。消灯してから再点灯するまでの時間は，**再始動時間** とよばれる。

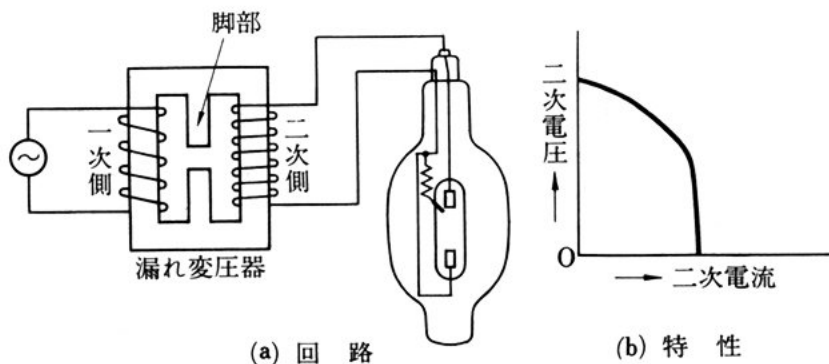
問 8. けい光ランプとけい光水銀ランプは，どこが異なるか。

（3） 漏れ変圧器の利用

水銀ランプを点灯するには，チョークコイル（安定器）のほかに，図9(a)のような漏れ変圧器が用いられる。漏れ変圧器では，二次側に高圧が発生し，二次側に電流が流れると，脚部の磁束（漏れ磁束）が増加し，二次電圧が減少する。図(b)は，その特性を示す。そのため，図(a)のように利用すると，ランプに必要な放電開始のための高圧を得ることができ，放電時に，ランプ内部抵抗が減少しても，過大電流が流れることはない。

問 9. 図9(a)，(b)で，二次電流が大きくなると，なぜ二次電圧は減少するか。

図 9　漏れ変圧器の利用

(a) 回　路　　(b) 特　性

3. 各種のランプ

(1) ナトリウムランプ

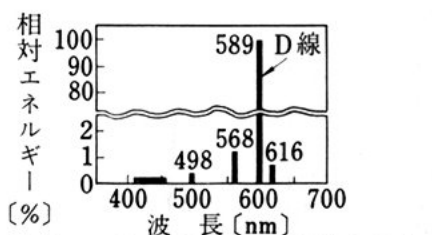
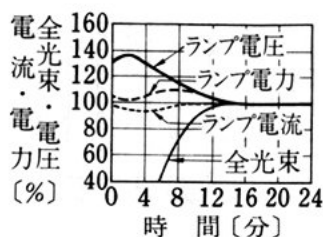
ナトリウム蒸気中の放電を利用する図10(a)のようなランプは，**ナトリウムランプ**とよばれる。この放電では，図(b)のように，589～589.6〔nm〕の黄色スペクトル線（実際は2本の線）が現れる。これは，最大視感度(555〔nm〕)に近いため，効率が良く，約150〔lm/W〕である。最高効率のときの蒸気圧は，約4×10^{-3}〔mmHg〕，管壁温度270〔°C〕である。これに対して，けい光ランプの管壁温度は，約40〔°C〕である。

管壁温度を270〔°C〕に保つため，ランプの構造は，図(a)のように，三重構造となっていて，中管と外管の間は，高真空にしてある。

点灯は，図のように，漏れ変圧器を利用する。その始動特性は，図(c)のようになっている。スイッチを閉じた直後は，ナトリウムの蒸気圧が低いので，希ガスによって放電が行われ，しだいにナト

図10　ナトリウムランプ

(a)

D線のエネルギーを100〔%〕とする。

(b) 分光分布

(c) 始動特性

リウムが蒸発して，約20分後に，安定したナトリウムによる放電が行われる。

高圧ナトリウムランプ　高圧ナトリウムランプは，高圧水銀ランプに似た構造のもので，発光管内にはナトリウム・水銀・キセノンガスを封入してあり，蒸気圧は0.1気圧である。発光管は，高温のナトリウム蒸気に耐える透光性の高純度アルミナ管が用いられる。効率は高く，100～150〔lm/W〕である。

問 10.　ナトリウムランプの特徴と用途を調べよ。

（2）キセノンランプ

キセノンランプは，キセノンガス中の放電を利用したランプで，細長い長アーク形と，図11(a)のような短アーク形とがある。

キセノンランプでは，石英管内のガスの圧力はかなり高く，ランプの効率は，20～40〔lm/W〕程度である。

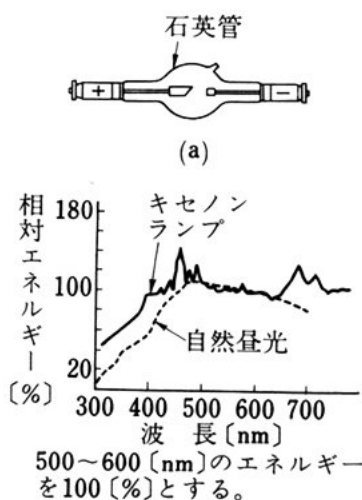
このスペクトルは，図(b)のように，連続部分が強く，しかも，紫外部から可視部にわたって，自然昼光色に近い特性をもっている。

図 11　キセノンランプ

(a)

相対エネルギー〔%〕
180
100
20
300 400 500 600 700
波　長〔nm〕
キセノンランプ
自然昼光

500～600〔nm〕のエネルギーを100〔%〕とする。

(b)

(c)　キセノンランプの例

ランプの大きさ	500 W 形	5 kW 形	10 kW 形
ランプ電圧〔V〕	20	30	220
水平光度〔cd〕	1300～1500	18000～20000	
全光束〔lm〕	13500～14000	160000～200000	220000
	短アーク形（直流用）		長アーク形

（照明学会編「照明のマニュアル」による）

短アーク形は，電極間隔が数ミリメートル程度でせまく，封入ガスの圧力は，点灯中 20～30〔mmHg〕程度である。交流点灯用のものと直流点灯用のものとがある。直流点灯用のものでは，始動に高圧パルス発生装置が必要である。

長アーク形は，封入ガスの圧力が比較的低く，交流で点灯される。

図(c)に，キセノンランプの例を示す。

キセノンランプは，映写用光源，標準白色光源，広場の照明などに利用されている。

問 11. 図11(c)の500W形のランプの効率を計算し，けい光ランプの効率と比較せよ。

(3) ネオン管とネオンランプ

電気照明の手段を用いて看板を作る場合，これを**電気サイン**という。図12(a)のように，細長い（曲げて作ってよい）光源は，**ネオン管**とよばれ，電気サインに広く利用されている。ガラス管には，加

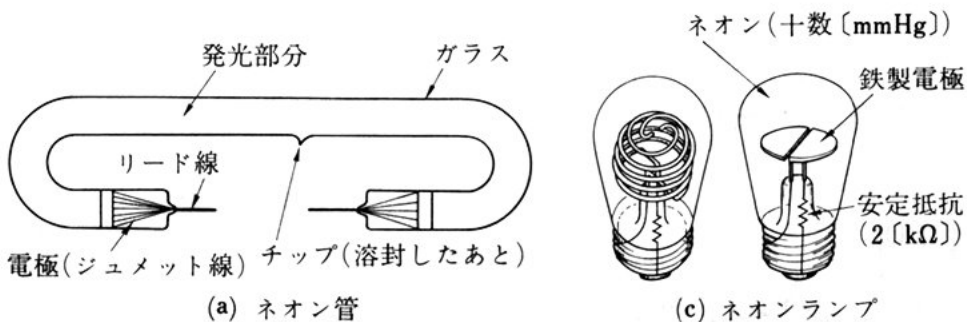



図 12 ネオン管とネオンランプ

(a) ネオン管　　(c) ネオンランプ

(b) ネオン管の例

色 名	略 号	原管別名	封入ガス	けい光塗料
赤ピンク	RP	けい光管	ネオン	青
青	B	透明管	アルゴン・水銀	なし

（照明学会編「照明教室14　電気サイン」による）

工容易な鉛ガラスを用い，電極には，純度の高い銅または鉄が用いられる。ネオン管から出る光の色は，内部に封入する気体の種類と，管の内壁に塗布するけい光塗料の種類によっていろいろあり，図(b)のような例がある。ネオン管の点灯回路には，漏れ変圧器（ネオン変圧器）が用いられる。これは，二次電圧が 15000〔V〕以下で，二次短絡電流が 50〔mA〕以下と定められている。

ネオンランプ　ネオン管は，放電のさいに生ずる陽光柱を利用したものであるが，電極間隔をせまくすると，陽光柱は消滅し，陰極グローが目立ってくる。これを利用したものが **ネオンランプ** で，図(c)のようなものがある。ネオンランプには，放電を安定させるため，安定抵抗が入っている。

問 12． ネオン管とネオンランプの違いを説明せよ。

半導体利用光源　硫化亜鉛系の特殊なけい光体を誘電体に混合して，数十マイクロメートル程度の薄膜にし，透明な電極の間にはさんで交流電圧を加えると，けい光を発する。これを **エレクトロルミネセンス**（**EL**）という。図(b)は，EL の例で，これを用いたものは，**電子照明** とよばれる。このほか，ガリウム（Ga）・りん（P）を利用した半導体は，**発光ダイオード** とよばれ，特殊な用途に用いられる。

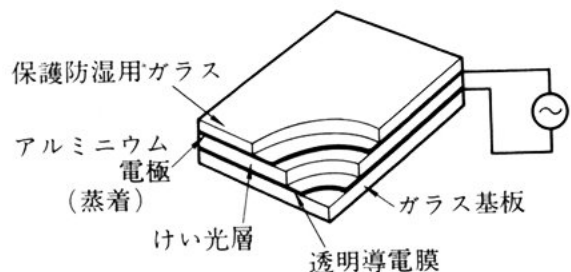



図 13　EL ランプの例

問 13． EL の実例について，その特性を調べよ。

問　題

1.　あるけい光ランプは，電圧 100〔V〕で，0.36〔A〕の電流が流れ，20〔W〕の電力を消費し，1000〔lm〕の光束を生ずるという。次の問いに答えよ。

(1)　力率はいくらか。

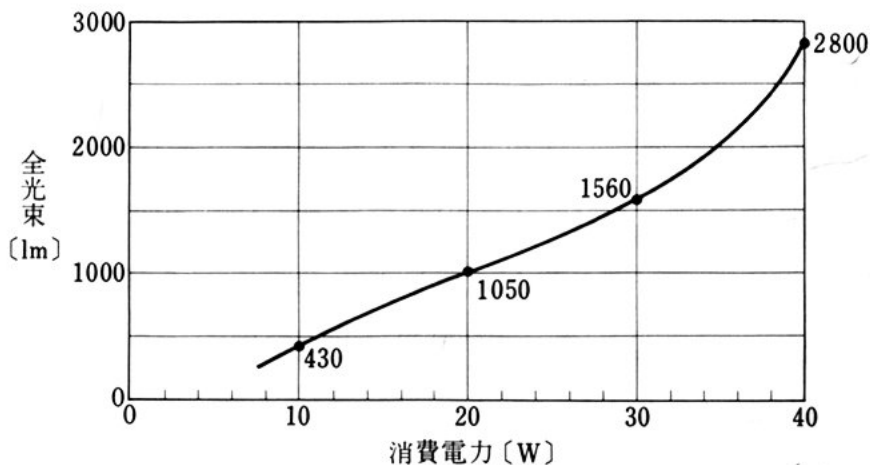
(2)　効率はいくらか。

2.　図 14 は，いろいろな消費電力をもつけい光ランプの，消費電力と全光束との関係を表す特性例である。次の問いに答えよ。

(1)　40〔W〕のけい光ランプの全光束は何ルーメンか。

(2)　その効率はいくらか。

(3)　図 14 に，効率－消費電力の特性をかく方法を考えよ。

図 14

照明設計

この節のねらい　良い照明を行うためには，その場所の使用目的，周囲の条件などを考えて，適当な照度を選ぶ必要がある。目には広範囲の調節作用があるので，周囲の状況に順応することができるが，わるい条件のもとでは，疲労を感ずることが多く，仕事の能率が上がらない。しかし，不必要な高い照度を与えることは，不経済であるので，適切な照明設計を行うことになる。

ここでは，照明設計の考え方について調べる。

1.　照明器具とその利用

(1)　光源と照明器具

電球などの裸の光源を，そのまま利用することは，環境を快適にするという観点からは適切でない。それで，かさその他と組み合わせて作られた照明器具を用いることになる。照明器具は，光源の支持・保護・装飾の役目を果たしている。

照明の光の性質を大きく左右するものは，光源そのものの特質である。表1は，すでに調べた光源の性質や用途などを挙げたもので，光源を選定する場合には，参考とする必要がある。

見やすくするための条件　照明器具を用いて照明を行う主な目的は，物を見やすくすることである。ここで，物がよく見えるという条件を考えてみると，次のことがいえる。

1)　照度が適切である。

2)　視角（見掛けの立体角）が大きい。

3)　明るさや色の対比（物と周囲の対比）が適切である。

表 1　光源を選ぶ目安

光源		効率(経済性)	発生熱	幾何光学的性質	光の色		主な用途
					演色性	色効果	
電球		わるい	多い，251 $\left[\frac{J}{(lm\cdot h)}\right]$	集光性	かなり良い	温か味がある	点滅の多い場所，集光性の必要なとき
けい光ランプ	標準形	良い	少ない 63 $\left[\frac{J}{(lm\cdot h)}\right]$	拡散性	DL 形に劣る		一般屋内 通路
	DL 形	標準形には劣る			良い	SDL 形は赤を美しく	色の効果が必要なとき
水銀ランプ	透明形	良い	けい光ランプよりやや良い	電球とけい光ランプの中間	わるい	緑を美しく	工場・通路・庭園
	HF 形	良い			透明形より良い		
高圧ナトリウムランプ		非常に良い	少ない	拡散性 高光束度	劣る	金白色	工場・スポーツ施設・道路
キセノンランプ		良い（劣る）		拡散性 集光性	非常に良い		映写用・特殊用

4)　視野内にまぶしさを感ずるものがない。

5)　見るのに許される時間がじゅうぶんある。

照明器具を配置して，より良い照明を行うためには，このような条件を考慮しなければならない。

問 1． 照明器具は，まぶしさを防ぐ工夫がなされている。そのためには，どんな方法がとられているか。　5

（2）　照明方式と照明器具

室内の照明を考えてみよう。この場合，図1の①，①′では，光源から下方（床）に光を放ち，床（作業面）に効果的に光を与えることができる。この方法は**直接照明方式**とよばれる。この方法では，作業者の手や頭の影が，強くできるおそれがあるので，それを避けるために，②，②′のように，一部の光が天井や壁に当たって，作業面　10

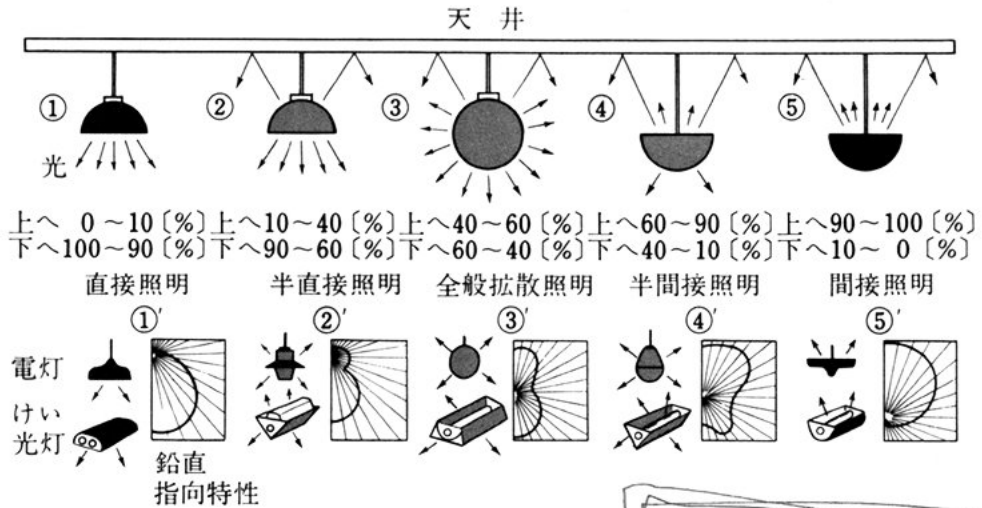



図 1 照明方式と器具の配光

にくるようにする方法が考えられる。この方法は，**半直接照明** とよばれる。この場合，天井や壁もある程度明るくなる。

これよりいっそう，室内の各部の照度が均一になるように工夫したものに，③，③′および④，④′，さらには⑤，⑤′の方法が考えられる。これらは，それぞれ，**全般拡散照明・半間接照明・間接照明** とよばれている。

このような照明方式は，それぞれ特徴があって，いずれも，好みや経済性を考えて，広く利用されている。また，それに応じて，照明器具も図2(a)～(h)のように，いろいろなものが作られている。

全般照明と局部照明　作業面全体・室内全体が，できるだけ均一になるように照明器具を配置するのを，**全般照明** という。これがいきとどいていると，影が生じない。また，昼間のように，明暗の対比が少なく，目の疲労も少ない。それに対して，必要な箇所だけに照明を行う方法は，**局部照明** とよばれる。一般には，全般照明と局部照明を併用していることが多い。天井灯をつけて，さらにランプスタンドを併用するのは，その例である。

(a) 直付け器具

(b) ペンダント

(c) ブラケット

(d) シールドビーム形ブラケット

(e) 埋め込み器具

(f) パイプペンダント

(g) シャンデリア

(h) スタンド

(i) トロファー照明

(j) 光天井照明

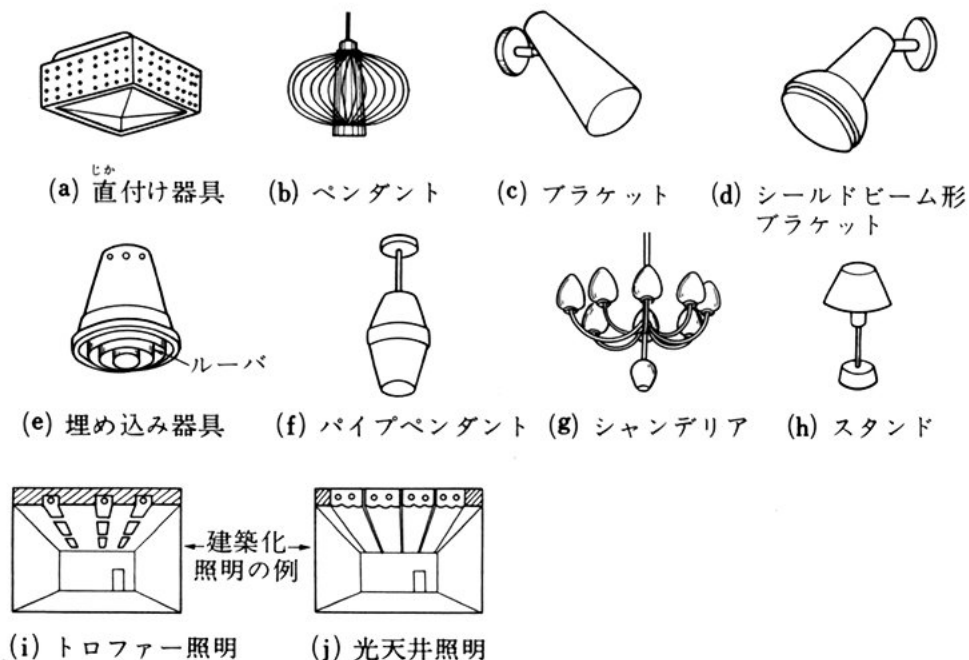



図 2　照明器具と建築化照明

建築化照明　より均一で明るい全般照明の方法として，図2(i),(j)のように，建物を造るときに，天井その他に光源を造り付けて，照明を行うものは，**建築化照明**とよばれる。この場合，建物の室自体が，照明器具の機能を果たしているように見える。

照度基準　人工照明によって，工場・学校・事務所などいろいろな施設を照らし，快い生活，よい作業を行う良い環境を作るには，1) 照度とその分布，2) まぶしさ，3) 影，4) 光色などについて考えなければならない。JIS Z 9110-1979では，それらのうち，照度について，表2のような照度段階を考え，いろいろな施設における望ましい照度を示している。照明設計においては，その例を参照にして，必要照度を決める。

表2 照 度 基 準

照度〔lx〕	工　場　の　作　業	学校(屋内)における場所の例
3000以上		
3000～1500	精密機械，電子部品の製造，印刷工場でのきわめて細かい視作業，例えば， ○組立 a，○検査 a，○試験 a，○選別 a， ○設計，○製図	
1500～750	繊維工場での選別，検査，印刷工場での植字，校正，化学工場での分析など細かい視作業，例えば， ○組立 b，○検査 b，○試験 b，○選別 b	製図室，被服教室，電子計算機室
750～300	一般の製造工程などの普通の視作業，例えば， ○組立 c，○検査 c，○試験 c，○選別 c， ○包装 a，○倉庫内の事務	教室，実験実習室，図書閲覧室，会議室，保健室,食堂，放送室，屋内運動場（750～200）
300～150	粗な視作業，例えば， ○限定された作業，○包装 b，○荷造り a	講堂，集会室，昇降口，廊下，階段，洗面所，渡り廊下（300～75）
150～75	ごく粗な視作業，例えば， ○限定された作業，○包装 c，○荷造り b，c	
75～30	○荷積み，荷下ろし，荷の移動などの作業（75～20）	倉庫，車庫，非常階段
30～20		
20以下		

注．a は，細かいもの，暗色のもの，対比の弱いもの，とくに高価なもの，衛生に関係ある場合，精度の高いことが要求される場合，作業時間の長い場合などを表す。

c は，粗いもの，明色のもの，対比の強いもの，がんじょうなもの，さほど高価でないものを表す。

b は，a と c の中間のものを表す。　（JIS Z 9110−1979 による）

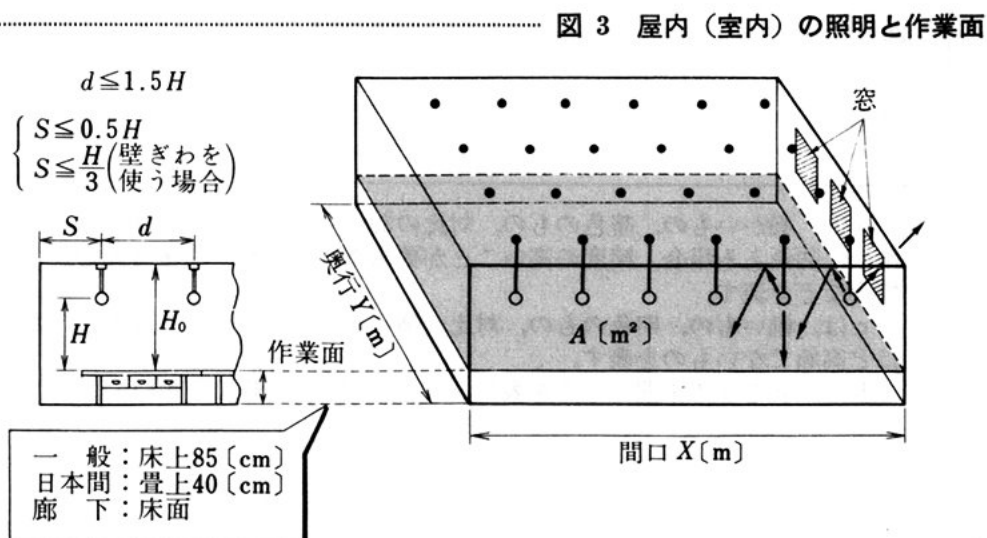
2.　屋内全般照明の設計

（1）　設計の考え方

一般に，全般照明では，多くの光源を分布して配置し，均一な照度が得られるようにする。この場合，明るくしたいと考えるところは，主として作業する平面で，一般に，床上85〔cm〕のところをいう。これを**作業面**とよんでいる。

作業面の平均照度を求める簡略な方法は，作業面に入射する全光束を，作業面の面積で割った値で考える方法である。それで，光源から放射されると考えられる総光束と，作業面に入射されると考えられる全光束との関係が明らかであれば，作業面に必要とする照度から，必要な光源の総光束を求めることができる。

総光束の求め方　面積A〔m²〕の作業面の照度をE〔lx〕とすれば，作業面に入射させなければならない全光束は，EA〔lm〕である。ところで，光源からの総光束F_1〔lm〕は，図3のように，窓の外に出るものや，壁による反射のために，減少して床に達するものもある。そこで，総光束F_1〔lm〕に対する作業面に達する光束EA〔lm〕の

図 3　屋内（室内）の照明と作業面

割合を**照明率**といい，U で表す。E, A, U と F_1 との間には，$F_1=\frac{EA}{U}$ の関係がなりたつ。

ところで，一つの光源から放射される光束が F〔lm〕で，これが N 本あれば，総光束は NF〔lm〕である。ここで，$NF=F_1$ と考えられるが，照明器具を光が通ることによって，光束は減少する。とくに，その保守状態がわるいと，器具から放射する光束は，かなり小さくなることがある。また，光源も使用時間が経過すると，規格に示されている光束の値より小さくなる。このような点を考慮して，照明器具からは，NFM〔lm〕の光束が放射されるものと仮定する。M を**保守率**といい，電球では0.5～0.8，けい光ランプでは0.5～0.7にとる。

以上のことから，次の式がなりたつ。

$$NF=\frac{EA}{MU} \tag{1}$$

問 2.　200〔m²〕の室の照度を500〔lx〕にしたい。照明率を0.3，保守率を0.7とすれば，必要な総光束はいくらか。また，1本について2000〔lm〕のけい光ランプを用いるとすれば，ランプは，何本必要か。

(2)　照明率と保守率の求め方

照明率 U は，天井や壁の反射率 ρ によって異なるとともに，図3に示すような，室の間口 X〔m〕，奥行 Y〔m〕，光源の高さ H〔m〕によって異なる。X, Y, H によって決まる値は，**室指数**とよばれる。

室指数 R_i は，次の式で示される。

$$R_i=\frac{XY}{(X+Y)H} \tag{2}$$

例えば，$H=2.5$〔m〕，$X=25$〔m〕，$Y=15$〔m〕のとき，

$$R_i=\frac{25\times15}{(25+15)\times2.5}=3.75$$

照明率は，天井や壁の反射率とともに，器具の形状にも関係する。

表3 照明率と保守率

照明器具	保守率 M	反射率 ρ 天井	70						50						30					
		壁	50		30		10		50		30		10		50		30		10	
		床面	30	10	30	10	30	10	30	10	30	10	30	10	30	10	30	10	30	10
		室指数 R_i	照明率 U																	
① 反射がさ 40 W けい光灯2灯用		0.60	43	35	30	29	25	24	36	34	29	28	25	24	34	33	29	28	24	24
		0.80	46	44	39	37	33	32	45	43	38	37	33	32	43	41	37	36	32	32
	良 75	1.00	53	49	45	43	39	38	50	48	44	42	38	37	48	46	42	41	38	37
		1.25	59	55	52	49	46	44	57	53	50	48	45	43	54	52	49	47	44	43
	中 70	1.50	64	59	57	53	51	48	61	57	55	52	50	48	58	56	53	51	48	47
		2.00	73	66	66	61	60	56	69	64	63	59	58	55	65	62	61	58	56	55
		2.50	78	70	71	65	66	61	73	68	68	64	63	60	70	66	65	63	61	59
	否 65	3.00	82	73	76	69	71	65	77	71	72	67	68	64	73	69	69	66	65	63
		4.00	87	77	82	73	77	70	82	75	78	72	74	69	77	73	74	70	71	68
		5.00	90	79	86	76	82	74	85	77	81	75	78	72	80	75	77	73	74	71
		10.00	98	84	95	83	93	81	91	82	89	81	87	80	86	81	84	79	83	78
② 薄形じか付け器具 40 W けい光灯2灯用		0.60	35	33	30	29	26	26	34	33	29	29	26	26	33	32	29	28	26	26
		0.80	43	41	38	37	34	34	42	40	37	36	34	33	41	39	37	36	34	33
	良 75	1.00	48	45	43	41	39	38	46	44	42	40	38	37	45	43	41	40	38	37
		1.25	53	49	48	45	44	42	51	48	47	45	43	42	49	47	45	44	42	42
	中 70	1.50	57	52	52	48	48	46	54	51	50	48	47	45	52	50	49	47	46	45
		2.00	63	57	58	54	54	51	60	56	56	53	53	50	57	54	54	52	51	50
		2.50	66	59	62	57	58	54	63	58	59	56	57	54	60	57	57	55	55	53
	否 65	3.00	69	61	65	59	62	57	65	60	62	58	59	56	62	59	59	57	57	55
		4.00	72	64	69	62	66	60	68	62	66	61	63	59	64	61	63	60	61	58
		5.00	74	65	72	63	69	62	70	64	68	62	66	61	66	62	64	61	63	60
		10.00	79	68	77	67	76	66	74	67	72	66	71	65	69	65	68	65	67	64

注．反射率・照明率・保守率の単位は〔%〕で示してある。　（照明学会「照明実務講座」より）

それで，表3のような，器具のデータを利用して求めると便利である。

例えば，室指数が4.00であって，使用する器具が，表3②のようなものであるとする。もし，天井の反射率が0.7，壁の反射率が0.5，床面の反射率が0.3であれば，照明率は0.72である。

5　なお，保守率 M は，表3から求められる。例えば，表3②のけい光灯を用いれば，保守状態が中であれば，$M=0.70$ である。

問 3. 二つの室があって，光源の高さ H は等しく，奥行・間口は，両者とも一方が他方の3倍である。どちらの照明率が大きいか。ただし，同じ照明器具（表3②）を用い，天井・壁・床面の反射率は同じとする。

10　**(3) 設計の手順**

屋内全般照明の設計手順は，次のようである。

1) 表2のような照度基準を考慮して，必要な照度を決める。

2) 表1，図1，図2などを参考として，光源の種別，照明器具，照明方式を決める。

15　3) 照明器具の高さ H〔m〕を決める。

4) 86～89ページの考え方で計算し，照明率・保守率・総光束を決める。

5) 図3，表3などを参考にして，照明器具の配置を決める。

問 4. 図4では，表3①のけい光ランプ（2本組のランプを使用）を用

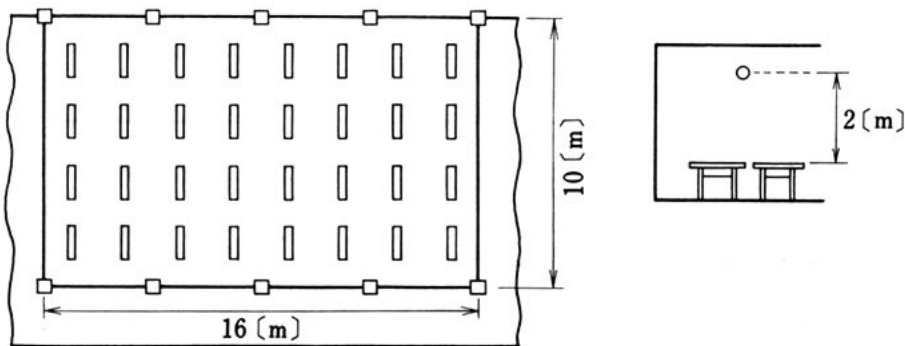



図 4

いている。ランプ1本の光束は 2400〔lm〕である。保守状態は良であり，天井・壁・床面の反射率は，それぞれ 0.5，0.3，0.1 である。室の照度を求めよ。

3. 道路の照明

歩行者または車両運転者などの夜間の道路利用者が，安全第一に，不安感なしに通行できるようにするのが，道路照明の目的である。とくに，車両運転者にとっては，前方路面上の障害物，道路の形状とその周囲がよく見え，進行方向を容易に予測して，不安感なしに走行することができるように照明されなくてはならない。

道路がじゅうぶん明るいことは，交通事故防止だけでなく，道路利用者の不安感の除去，犯罪の防止に大切なことである。

JIS では，道路の照度について，地下商店街 1000～200〔lx〕，商店街 200～20〔lx〕，市街地歩道 100～20〔lx〕，住宅地道路 10～1〔lx〕

図5　道路の照明

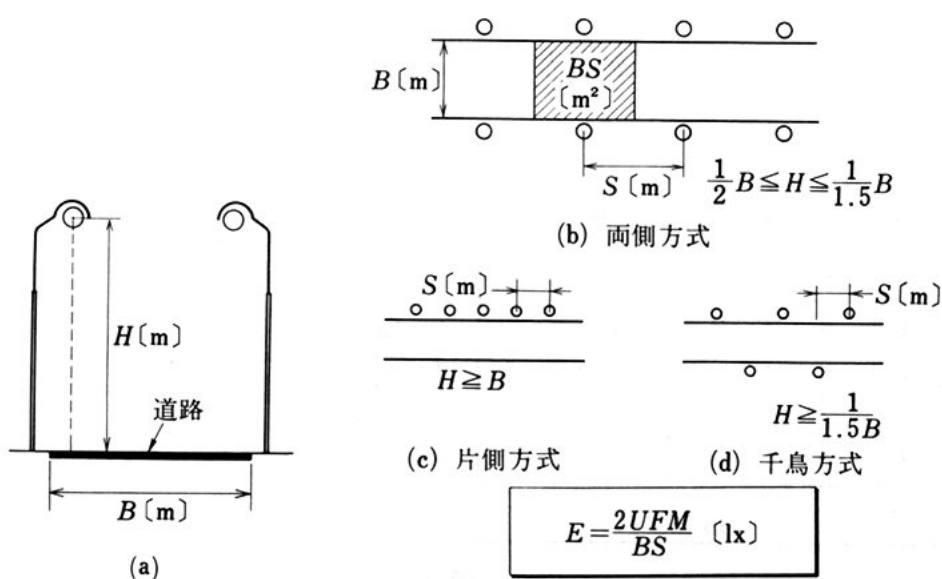
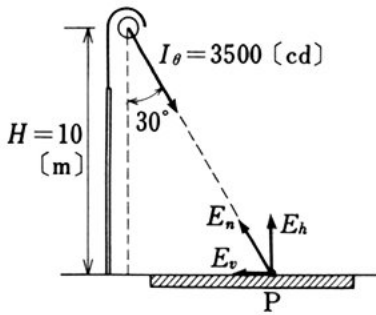



図 6 点光源と考えた場合

以上の照度段階であることを推しょうしている。

道路の照明方式と照度の計算　道路を照明するには，図5のように，道路に沿って光源を配列する必要がある。この場合，両側方式・片側方式・千鳥方式がある。

両側方式における平均照度 E〔lx〕について考えると，室内全般照明の場合と同様に，光束法で次のように表すことができる。

$$E=\frac{2UFM}{BS} \qquad (3)$$

ここで，F〔lm〕は光源の光束，B〔m〕は道路の幅，S〔m〕は光源の間隔，Mは保守率，Uは照明率であり，光源の光束のうち，どの程度が道路に投射されるかを示す値である。

この場合，光源は高いところにあるため，点光源と考えて照度を計算することができる。ここで，図6の式を用いると，高さ H〔m〕と角度 θ から，水平面照度・鉛直面照度・法線照度が求められる。

問 5. 式 (3) において，$F=20000$〔lm〕，$S=50$〔m〕，$B=10$〔m〕，$U=0.92$，$M=0.5$ とすれば，平均照度 E はいくらか。

問 6. 図6において，$I_\theta=3500$〔cd〕，$H=10$〔m〕である。点Pの水平面照度・鉛直面照度・法線照度を求めよ。

問　題

1.　図7は，電気計測実習室の例である。次の問いに答えよ。

(1)　FL 40 の昼光色（D）けい光ランプ1本の全光束は何ルーメンか。

(2)　この図では，けい光ランプが何本ついているか。

(3)　それらの全体の光束はいくらか。

(4)　室指数 $R_i=\dfrac{XY}{(X+Y)H}$ はいくらか。

(5)　天井の反射率を 0.5，壁の反射率を 0.1，床面の反射率を 0.1 とすると，照明率 U はいくらか。

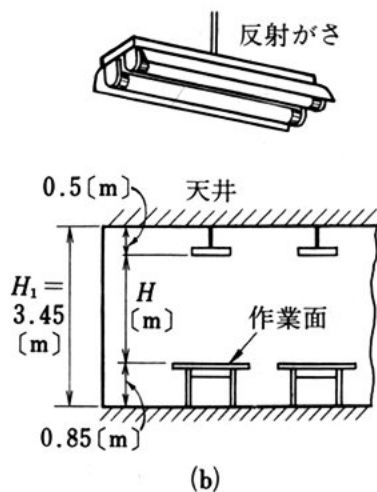
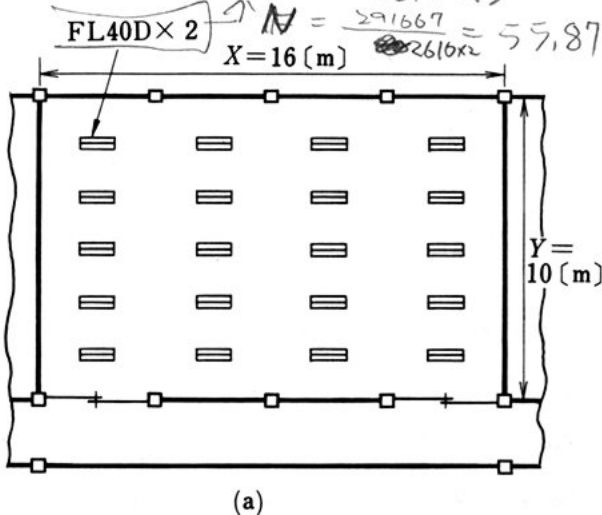
(6)　保守率 $M=0.7$ とすると，作業面の入射光束はいくらか。

(7)　作業面の平均照度はいくらか。

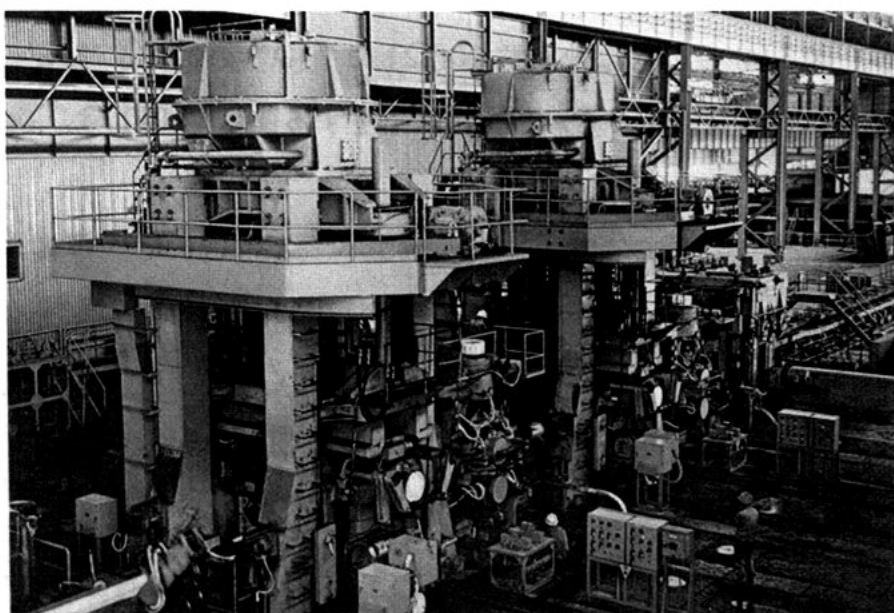
2.　図7の場合，けい光灯で消費する全電力はいくらか。この場合，1〔m²〕当たりについて，何ワットの電力を消費していることになるか。ただし，各ランプに付属している安定器の消費電力は 10〔W〕とする。

3.　図7で，$X=20$〔m〕，$Y=10$〔m〕とし，図(b)は変わらない。この実習室の平均照度を 700〔lx〕程度にしたい。光源の数と配置を考えよ。ただし，天井の反射率は 0.5，壁・床面の反射率は 0.1，保守率は 0.75 とする。

図 7

第8章
電　　熱

電熱は，電熱器・電気ストーブなどのように，家庭においても利用されているが，産業界においては，よりいっそう広く利用されている。鋼の圧延設備・焼なまし設備・鋳造設備などは，その例である。

この章では，まず，熱の性質，温度とその測定など，熱についての基礎的な事項を調べ，次に，電熱機器について調べる。

鋼の圧延設備

電熱の基礎

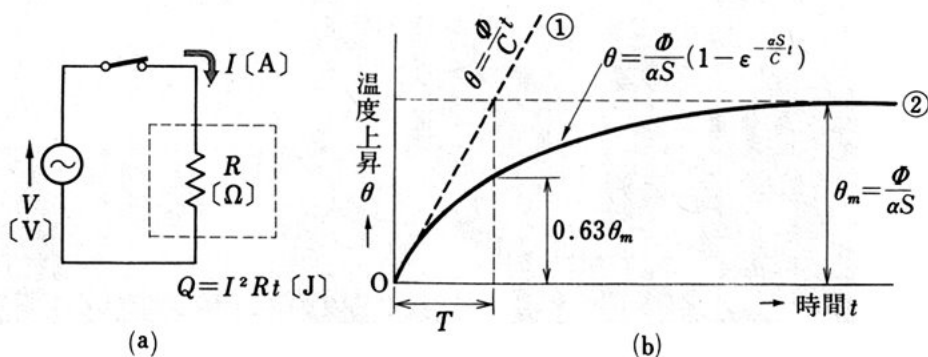
この節のねらい　抵抗線に電流が流れると，ジュール熱が発生する。これを熱の発生源として利用するためには，熱の放散についての理解がなくてはならない。また，抵抗線やこれを支える絶縁材料，さらに，高温において熱をさえぎる熱絶縁材料などについての理解も大切である。

ここでは，それらについて調べるとともに，温度の測定と制御などの基礎的な事項について調べる。

1.　電熱の発生と伝達

(1)　電熱の発生

電熱を加熱方式で分類するといろいろあるが，**抵抗加熱**とよばれるものは，すでに学んだジュール熱を利用するものである。すなわち，図1(a)のように，抵抗 R〔Ω〕に I〔A〕の電流が流れ，P〔W〕の電力を消費するとき，t 秒間に発生する熱量 Q〔J〕は，次の式で示される。

図1　温度上昇特性

$$Q = I^2Rt\,〔\mathrm{J}〕= Pt\,〔\mathrm{J}〕 \qquad (1)$$

したがって，1〔kW·h〕の電力量は，3600〔kJ〕の発熱量に等しく，これは，860〔kg〕の水の温度を1〔°C〕上昇させる熱量である。

問 1. 1〔kg〕の水を1〔°C〕上昇させるのに必要な電力量はいくらか。

(2) 温 度 上 昇

物体に熱量 Q〔kJ〕を加えると，物体の温度はこの熱量に比例して上昇する。温度の上昇 θ〔°C〕は次の式で表される。

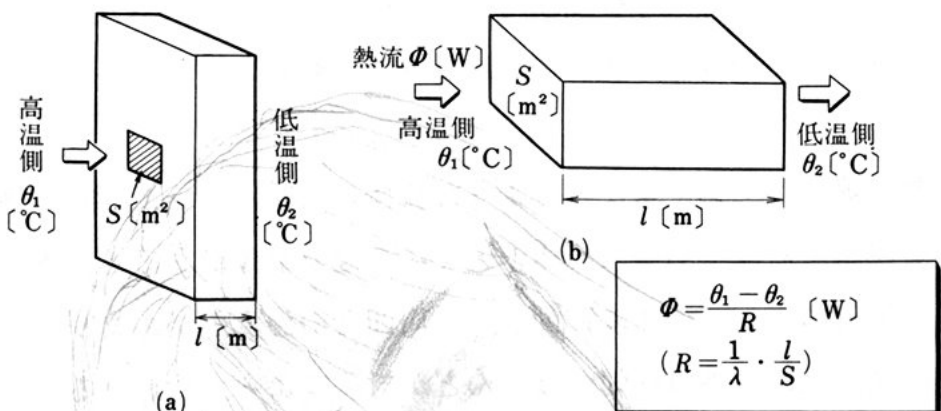
$$\theta = \frac{1}{C}Q \qquad (2)$$

C は，物体の温度を1〔°C〕上昇させるのに必要な熱量で，これを**熱容量**という。熱容量 C〔kJ/°C〕は，物体の質量 m〔kg〕と，比熱 c〔J/(kg·°C)〕との積で表される。

(3) 熱 の 伝 達

熱は，伝導・対流・放射のかたちで伝わる。

伝　導　図2(a)のように，物体の左側の熱が右側に伝わる場合，S〔m²〕の部分について，図(b)のように考えると，次のことがいえる。すなわち，温度差を $\theta = \theta_1 - \theta_2$〔°C〕，熱流を Φ〔W〕とすると，次の式がなりたつ。

図 2 熱 の 伝 導

$$\Phi=\frac{\theta}{R} \qquad (3)$$

ここで，R〔°C/W〕は**熱抵抗**とよばれ，次のように示される。

$$R=\frac{1}{\lambda}\cdot\frac{l}{S} \qquad (4)$$

上の式の λ〔W/(m·°C)〕は，**熱伝導率**とよばれる。

式（2），（3），（4）などからわかるように，熱流・熱量・温度差・熱容量などの関係は，すでに学んだ，電気回路の電流・電気量・電圧・静電容量などの関係と似ている。表1は，熱系の量と電気系の量とを比較したものである。

表1　熱系と電気系の対応表

熱系の量	電気系の量
温度差	電圧
熱量	電気量
熱流	電流
熱伝導率	導電率
熱抵抗	電気抵抗
熱容量	静電容量

放　射　すべての物体は，その絶対温度の4乗に比例した強さの温度放射を行う。それで，高い温度 T_1〔K〕の物体と低い温度 T_2〔K〕の物体とが，面積 S_1〔m²〕の境界で接しているときに生ずる熱流 Φ〔W〕は，次の式で表される。

$$\Phi=\phi\sigma(T_1^4-T_2^4)S_1 \qquad (5)$$

ここで，σ は**ステファン-ボルツマン定数**（5.6696×10^{-8}〔W/(m²·K⁴)〕）であり，ϕ は両物体の表面における**実効放射率**とよばれるものである。

対　流　空気や水などのような流体の運動によって，熱が移動する現象が対流である。流体の近くに高温の物体があると，熱は伝導や放射によって流体に移動する。周囲との温度差があまりないときには，流体の熱の移動はほとんどが対流によって行われる。

問2.　σ の値を W/(cm²·K⁴) の単位で示せ。

問 3. 厚さ10〔cm〕のマグネシアれんが（$\lambda=2$〔W/(m·°C)〕）の壁の内外の温度差が400〔°C〕であるという。伝導によって伝わる熱流は，1〔m²〕当たりいくらか。

問 4. 式（5）で，$T_1=400$〔K〕，$T_2=0$〔K〕，$\phi=0.04$（アルミニウム）であるという。熱流を求めよ。

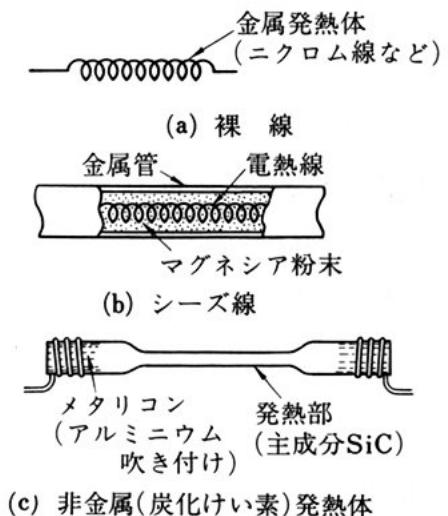
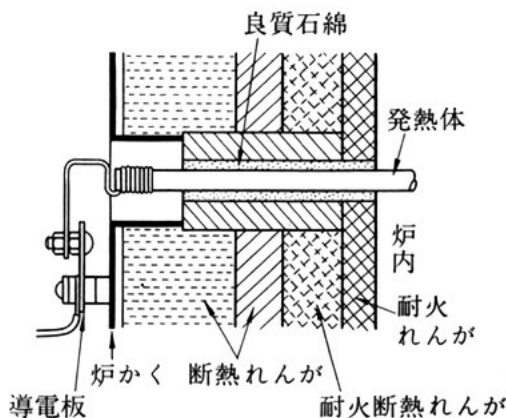
2. 電熱用材料

（1） 電熱材料

図3のように，**電気炉**は，熱を発生するための発熱体，耐熱（耐火）のためのれんが，断熱のためのれんが，高温においても電気絶縁をよくするための石綿などから作られている。

このような発熱体，耐熱保温体（耐熱材・保温材・耐熱電気絶縁材）は，**電熱材料** とよばれている。電熱材料の中には，高温の被熱物に直接接触して電流を導くとか，放電して加熱するために用いる電極材料も含めて考えるのがふつうである。

図 3 電気炉の炉壁の例

図 4 発熱体

問 5.　耐熱電気絶縁材と一般の電気材料は，どこが異なるか。

問 6.　図4のシーズ線は，裸線に比べてどんな特徴をもっているか。

(2)　発　　熱　　体

発熱体には，図4のように，いろいろなものがある。図(a), (b)のような発熱体は**金属発熱体**，図(c)のような発熱体は**非金属発熱体**とよばれている。一般に，次のような性質をもったものであれば，発熱体として利用できる。

1)　適当な抵抗率をもち，その温度係数があまり大きくないこと。

2)　使用温度にじゅうぶん耐える耐熱性をもっていること。

3)　化学的に安定であること。

4)　発熱のときに有害ガスを発生しないこと。

金属発熱体　　白金線・タングステン線・モリブデン線のように，純金属発熱体も用いられることがあるが，一般には，ニクロム線とよばれるもので，表2のような電熱用ニッケルクロム線・電熱用鉄

表 2　電熱用ニッケルクロム線・電熱用鉄クロム線の組成（単位　%）

種　　類	Ni	Cr	Al	Mn	C	Si	Fe
電熱用ニッケルクロム線　1種　NCHW 1	77以上	19～21	—	2.5以下	0.15以下	0.75～1.6	1以下
電熱用ニッケルクロム線　2種　NCHW 2	57以上	15～18	—	1.5以下	0.15以下	0.75～1.6	残部
電熱用鉄クロム線　1種　FCHW 1	—	23～26	4～6	1.0以下	0.10以下	1.5以下	残部
電熱用鉄クロム線　2種　FCHW 2	—	17～21	2～4	1.0以下	0.10以下	1.5以下	残部

	NCHW 1	NCHW 2	FCHW 1	FCHW 2
抵抗率〔μΩ·m〕(20〔°C〕)	1.08±0.05	1.12±0.05	1.42±0.06	1.23±0.06
最高測定温度〔°C〕	1100	1000	1250	1100

（JIS C 2520-1986 による）

クロム線などの合金線，または合金帯が用いられる。

非金属発熱体　黒鉛，炭化けい素の発熱体がよく用いられる。いずれも抵抗率が大きく，機械的にもろいので，ふつう，線や帯状にすることなく，棒状として用いられる。これは，負性抵抗をもっているので，取り扱いに注意する必要がある。

問 7. 物質が発熱体として利用できるためには，どんな条件が必要か。

（3） 耐 熱 保 温 材

炉の内張りなどには耐熱材（耐火材），その外側には保温材，高温部分の電気絶縁には耐熱電気絶縁材が用いられる。

耐熱材には，高温に耐え，化学的に安定なものが望まれる。炉内のふんいきは，酸性の場合もあれば塩基性の場合もある。耐熱材にも，酸性のものもあれば塩基性のものもある。それで，性質の同じものを用いる。表3のけい石れんがなどは，耐熱材の例である。

表 3　耐熱保温材の熱伝導率 λ と体積比熱 c

（単位 λ [W/(m・°C)]，c [J/(m³・°C)]）

種類	見掛けの比重	温度〔°C〕 30		400		850		1450	
		λ	c	λ	c	λ	c	λ	c
			$\times 10^6$		$\times 10^6$		$\times 10^6$		$\times 10^6$
石綿	0.834	0.869	0.85	0.751	1.00	0.443	1.30		
ガラス綿	0.624	0.203	1.19	0.291	1.46				
保温れんが（イソライト）	0.662	0.274	0.95	0.325	1.08	0.430	1.34		
けい石れんが（酸性）	1.80	1.604	1.70	1.54	1.41	1.900	1.65	2.654	2.14
マグネシアれんが（塩基性）	2.65	9.968	2.91	4.212	2.55	4.005	2.92	3.034	3.12
カーボランダムれんが（中性）	2.015	2.975	2.25	6.300	3.11	7.271	3.28		
コンクリート	2.366	2.566	2.61	1.840	2.48	1.80	2.56		
赤れんが	1.749	1.055	1.70	1.101	1.80	1.397	2.06		

（電気学会編「電熱工学便覧」による）

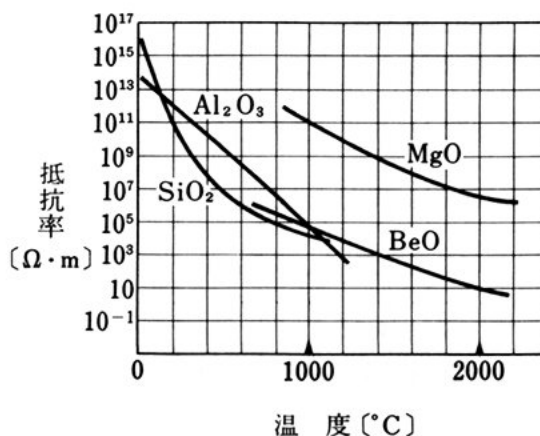
保温材は熱の絶縁材料であるが，目的によっては，必ずしも高温に耐える必要はない。一般に耐熱材も，それ自身ある程度の保温性をもっている。保温材には，保温ガラス綿のような鉱物性繊維，けいそう土のような水練材，布類のような有機繊維，木材のような木質品などがある。

耐熱電気絶縁材として，雲母や雲母の合成品がよく用いられる。しかし，これらは強い耐熱性はもっていない。

一般に，耐熱保温材も比較的低い温度では，かなりの電気絶縁性を示すが，高温になるに従って導電性を増す。

サーメット（cermet）は，セラミックス（ceramics）と金属（metal）の合成語である。サーメットは，4，5，6族の金属の酸化物・炭化物・けい化物・ほう化物・窒化物などの粉末に，金属（コバルト・ニッケル・鉄など）の粉末を入れて混合し，水素中・真空中または適当なガス中で焼結したものである。耐熱性・耐食性・硬さ・可塑性・機械的強さなどが優れている。

図5は，耐熱性酸化物の抵抗率の温度特性の例を示したもので，これは，成分・製法によって，かなり異なった特性になる。

図 5　耐熱性酸化物の抵抗率の温度特性

問 8. FCH 2 の材料の直径が 1〔mm〕で，長さが 10〔m〕であるという。この材料の抵抗値を求めよ。

問 9. 酸化アルミニウム・酸化マグネシウムは絶縁物かどうか。

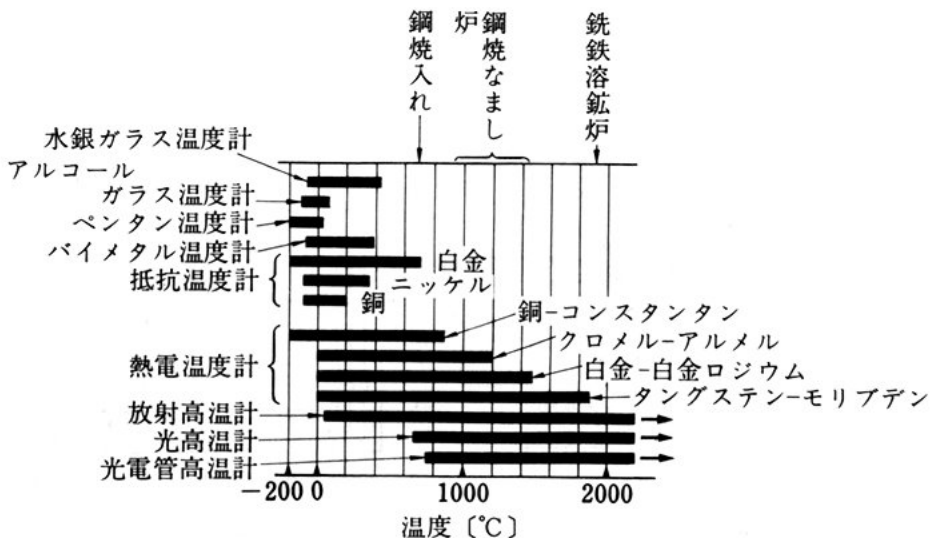
3. 温度の測定

温度計には，図 6 のように各種のものがある。

接触式　水銀温度計による温度の測定では，温度の検出端（検出部）を測定対象の内部または表面につけて，検出端の温度を測定対象と同じ温度にして測定する。このように接触して測定する方法を**接触式**という。

これまでに学んだ棒状ガラス温度計（水銀温度計・アルコール温度計）・熱電温度計・抵抗温度計は接触式である。これらの温度計は，図 6 のように，主として低い温度の測定に用いられる。

放射式　接触式と異なり，検出端を測定対象に直接接触させず，測定対象からの放射エネルギーによって検出部に温度を感知させる。

図 6　温度計の常用測定範囲

このような測定の方法を**放射式**という。

接触式は，測定対象の熱的状態を乱すことが多く，また原理的にも，高温測定には温度の限界が考えられる。とくに，測定対象が運動していて，接触できない場合には使えない。それに対して，放射式は，以上のような欠点はない。この方法は，主として高温の場合の表面温度の測定に適しているが，内部の温度の測定はできない。

放射式温度計には，放射高温計・光高温度計がある。

放射高温計　高温の物体からは，可視光線はもちろん，紫外線や赤外線も放射している。放射高温計は，この放射エネルギーを受けて，物体の温度を測ろうとするものである。

図7(a)は，放射高温計の原理図である。炉からの熱線を含んだ放射エネルギーが受熱板に入ると，受熱板は高温となる。受熱板（温接点）と銅片（冷接点）との間には，熱電対が直列に並べてあり，その発生電圧をミリボルト計で測る。熱電対列の発生電圧と，物体の温度との間には一定の関係があるので，この関係を調べることによって，ミリボルト計に温度目盛を施すことができる。これが放射高温計の原理である。

図7　温度計の例

(a) 放射高温計　　(b) 接触式温度計

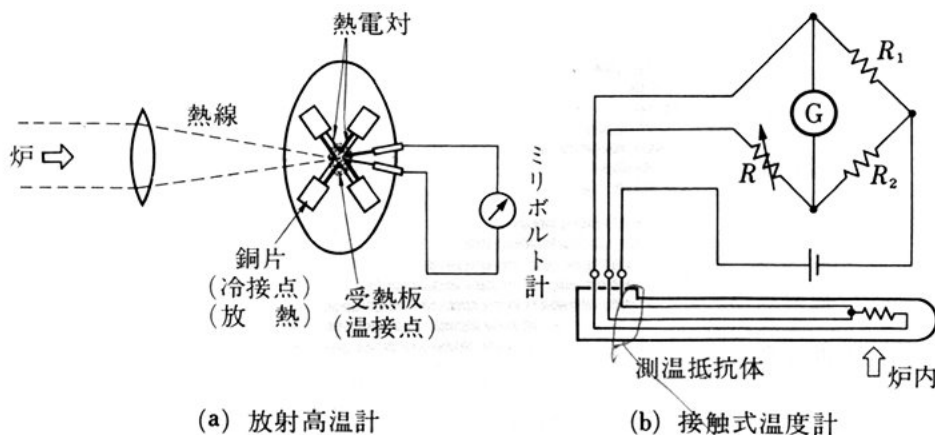
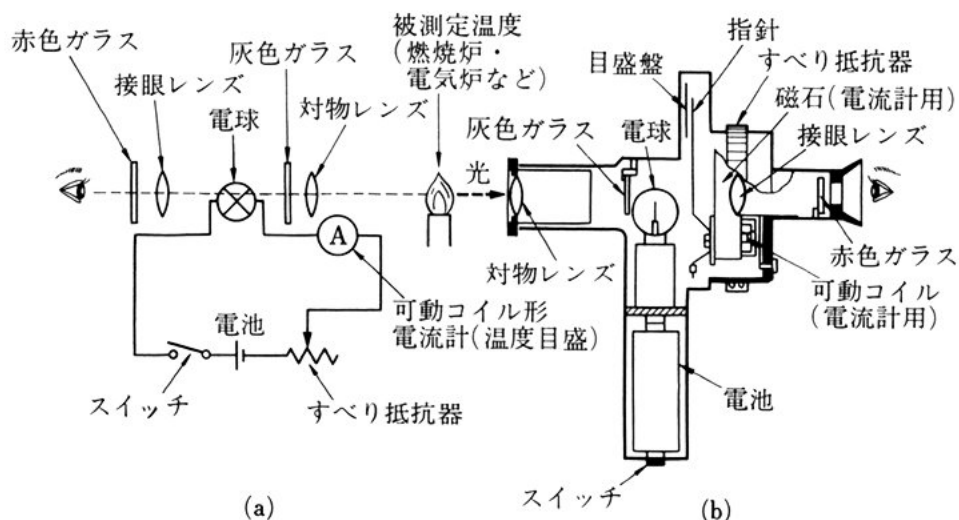



図8 光 高 温 計

光高温計　p. 57～58の色温度で学んだように，高温物体は光を放射するが，その光の色は，温度によって異なる。光高温計は，これに着目して工夫された温度計である。

図8(a)において，スイッチを閉じると，電球のフィラメントが点灯する。被測定物の光の色と，フィラメントの光の色とが同じになるように，すべり抵抗器を調整する。そのとき，電流計はある値を指示する。もし，被測定物の温度が高いと，電流計の指示が大きいところで，被測定物の光の色と，フィラメントの光の色とが同じになる。

それで，あらかじめ温度のわかっている物体について，同様な操作で電流計の指針を触らし，その指針の示す目盛に温度目盛を施しておけば，この装置は，温度計として用いることができる。

図(b)は，光高温計の構造例を示す。

問 10.　図7(b)の温度計で，測温抵抗体とブリッジ回路との間に，3本のリード線があるのはなぜか。

問　　題

1.　家庭用の電気こんろの容量は，600，1200，2000〔W〕のものが標準となっている。次の問いに答えよ。

(1)　使用している発熱体は，どんな種類のものか。

(2)　使用している熱絶縁材料・電気絶縁材料には，どんなものがあるか。

(3)　底の熱板には，どんな材料が用いられているか。その役目は何か。

(4)　600〔W〕形の電気こんろの効率 η は，標準容器を使った場合，77.6～92.6〔%〕であるという。1〔kg〕の水の温度を 30〔°C〕上昇させるのにかかる時間はいくらか。η は，湯に伝わる熱量と電気こんろの発生熱量との比で，80〔%〕とする。

2.　電気ストーブには，100〔V〕および 200〔V〕用で，500，1000，2000，3000，5000〔W〕のものがある。次の問いに答えよ。

(1)　放射式・対流式・放射対流式・温風式のそれぞれの構造について調べ，特徴を述べよ。

(2)　200〔V〕，5000〔W〕の電気ストーブを10時間使った場合の，消費電力量〔kW·h〕と発生熱量〔kJ〕を求めよ。

3.　電熱用ニッケルクロム線（1種）の抗抗率はいくらか。その直径が3〔mm〕で，長さが 10〔m〕の抵抗はいくらか。また，それに 200〔V〕の電圧を加えると，消費電力はいくらか。さらに，これを 20 分間通電するときの発熱量を，kJ の単位で求めよ。

4.　熱伝導率 0.1163〔W/(m·°C)〕の木材（厚さ 20〔cm〕）に，10〔°C〕の温度差を与えたときに生ずる熱流はいくらか。

各種の電熱装置

この節のねらい　電熱装置には，いろいろなものがある。比較的多量の熱を発生する装置で，高温になるょうに工夫したものに，電気炉がある。それに対して，比較的低温で，よく用いられるものに，乾燥炉がある。また，一般の発熱装置では実現できそうにないような加熱，例えば，真空管の中に入っている金属の加熱などが容易にできるものに，高周波加熱炉がある。

ここでは，これらの例について調べる。

1. 電　気　炉

(1) 電気炉の種類

金属工業・化学工業・窯業(ようぎょう)・機械工業などでは，金属の溶解・熱処理・焼結などの作業が必要であり，炉とよばれるものが用いられている。炉には，燃焼炉のように，重油・石炭などの燃料を燃焼するもの，原子炉のように，核反応を利用するものなどがある。電熱を利用するものは**電気炉**とよばれ，使いよく，生産能率を高めることができるので，工場・研究所などで広く用いられている。

電気炉を，加熱方式によって厳密に分類することはむずかしいが，原理的には，抵抗炉，アーク炉，誘導炉に分けられる。

電気炉の定格は，一般に，1回で処理する(溶解など)材料の質量(公称容量 t)，電力容量(皮相電力 kVA)，供給電圧(公称電圧 V)などで表す。

問 1.　電気炉の種類を三つ挙げよ。これらの発熱原理は，すべてジュール熱を利用したものといえるか。

(2) 抵　抗　炉

抵抗炉には，間接加熱方式と直接加熱方式がある。

間接加熱方式　図1(a)のように，炉内に抵抗体を置き，これに電流を流して発熱させる抵抗炉は，被熱物に電流を直接流さないので，**間接式抵抗炉**とよばれる。発熱体には，ニッケルクロム線発熱体，カーボランダム発熱体などが用いられる。カーボランダムは，炭化けい素を主成分としたもので，図(b)は，その特性の例である。

特殊な間接式抵抗炉　炉内に溶融塩を満たし，電極を設け，それに電流を流して加熱する。これには，鋼・軽合金などの被熱物を投入して，熱処理を行う方法がある。このような炉は**塩浴炉**とよばれ，均熱・恒温・急熱・急冷などが必要なときによく用いられる。

このほか，黒鉛管(タンマン管)の両端面に電極を押し付けて，これを赤熱し，それによって被熱物を加熱する**タンマン炉**，クリプトールを発熱体として用い，クリプトールの中に埋められたるつぼの中の金属を溶かすような工夫をした**クリプトール炉**などがある。

図1　間接式抵抗炉の例

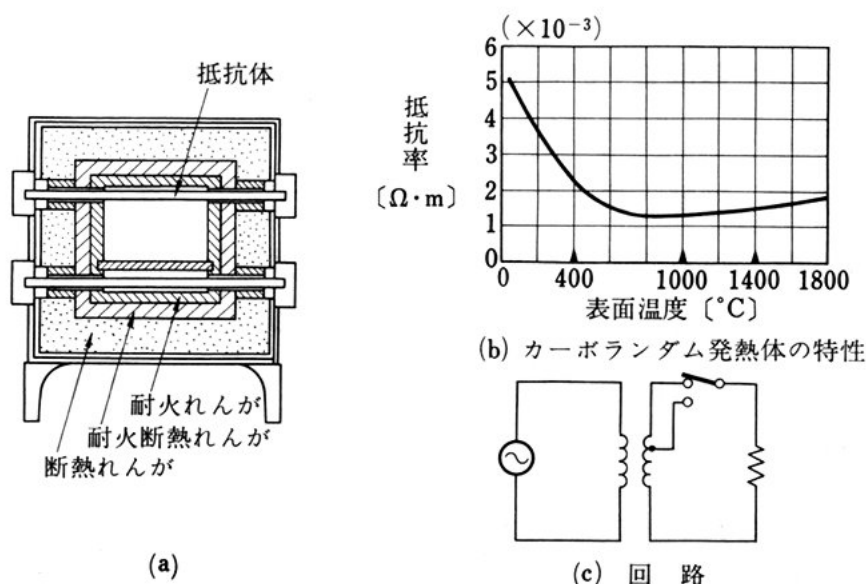
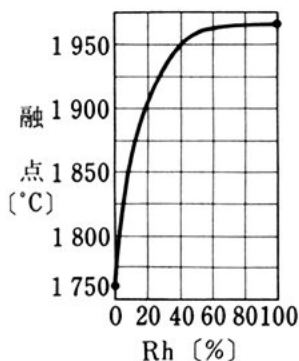
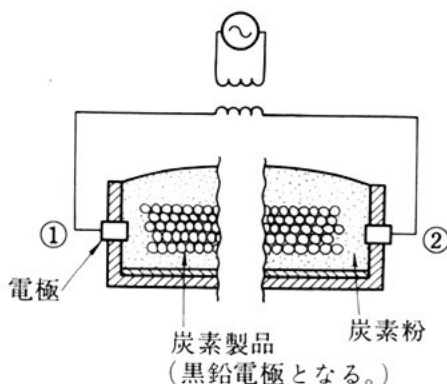



図 2　黒鉛化炉（黒鉛電極製造炉）…… **図 3　白金ロジウム合金の融点**

直接加熱方式　黒鉛電極を製造するような場合，図2のように，炭素製品を炉内に並べ，まわりに炭素の粉を盛る。電極①，②を通じて電流を流すと，被熱物である炭素製品にも電流が流れ，発熱して高温となり，黒鉛化される。このような抵抗炉は，**直接式抵抗炉**とよばれる。

一般に，間接式抵抗炉は，消費電力が比較的小さい場合に用いられ，直接式抵抗炉は，導電性の被熱物で，消費電力が大きい場合に用いられる。

問 2.　図1(c)，図2のように，変圧器を電気炉と組み合わせて用いることがある。なぜか。

問 3.　間接式抵抗炉では，高温炉に，図3のような白金ロジウム合金で，ロジウム40〔%〕程度のものがよく用いられる。なぜか。

（3）　アーク炉

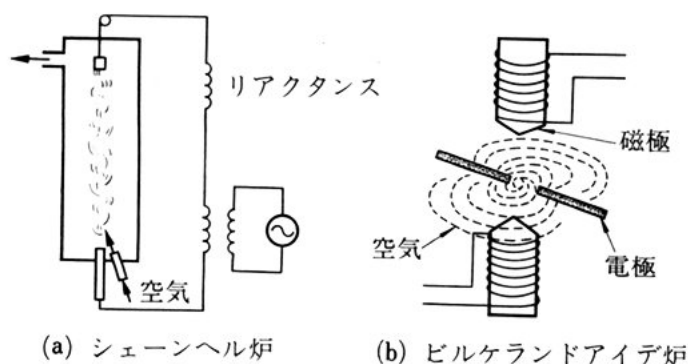
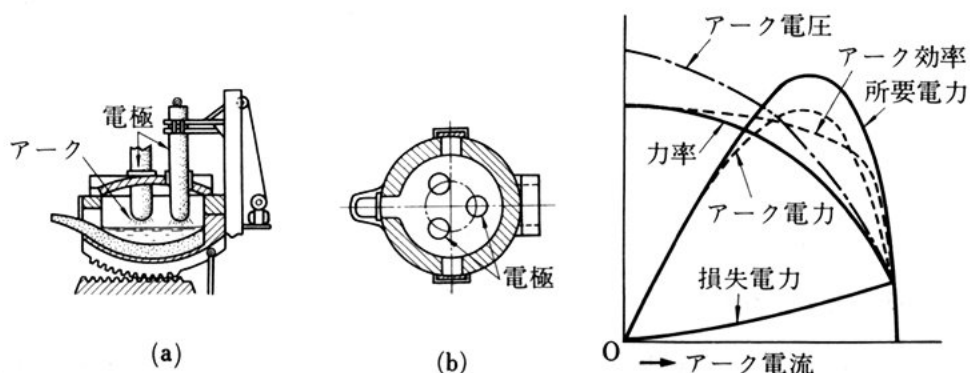
アーク炉は，電極間にアークを発生させ，その放射熱で被熱物を加熱する方式の炉である。この場合，被熱物にはアークが飛ばないので**間接式アーク炉**とよばれる。間接式アーク炉は，銅合金・アルミニウム合金などの融解にも用いられる。図4は，4000～5000〔V〕

(a) シェーンヘル炉　　(b) ビルケランドアイデ炉

図4 高圧炉の例

の高電圧を加えてアークを発生させ，アーク熱で空気中の酸素と窒素を化合させるための装置で，**高圧炉**とよばれる。図(a)では，化学反応を広く起こさせるため，空気を送り込み，アークの長さを長くして，空気とアークの接触面積を大きくしている。また，図(b)では，磁気力を利用して，アークを広げている。

直接式アーク炉　炉の電極と被熱物の間に直接アークを飛ばして，被熱物を加熱する方式のものは，**直接式アーク炉**とよばれ，図5は，製鋼用に用いられるもので，**エルー炉**とよばれる。三相用のため，3本の電極が炉ぶたからそう入され，被熱物の上の方に配置されている。被熱物として溶銑・スクラップを投入し，精錬後に炉

図5 エルー炉の構造　　**図6 アークの特性**

体を傾けて溶鋼を取り出す。

アーク炉は，アーク放電によって電極が消耗するので，絶えず電極の長さを制御する必要がある。また，電流を流し始めてから材料が融解するまでの間は，電流の変動が激しく，電極の調整は，それに即応しなくてはならない。図6は，アークの電気的な特性を示す。

問 4. エルー炉には，かくはん装置・集じん装置とよばれるものが付属している。なぜか。

2. 誘導加熱

（1） 低周波誘導炉

図7のように，鉄心に一次巻線を巻き，二次巻線に相当するものとして，耐火物に囲まれた融解金属を配置する。一次巻線に交流電流を流すと，鉄心に生ずる磁束が変化し，融解金属に電流が流れて発熱する。使用する交流には低周波交流，とくに商用周波数のものが用いられる。このような原理を利用した炉は，**低周波誘導炉**とよばれる。

一般に，低周波誘導炉では，湯だめの中の融解金属すなわち溶湯の各部分が，電磁力の働きで互いに引き合い，そのために溶湯が盛り上がってよくかき混ぜられる。合金を作る場合などは，よく混ざり，成分が均一になるなどの利点がある。その反面，こうした働きがあまり大きいと，二次導体に相当する溶湯がくびれて，回路が開かれ，電流が流れなくなる。そう

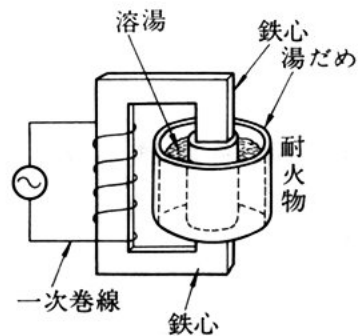
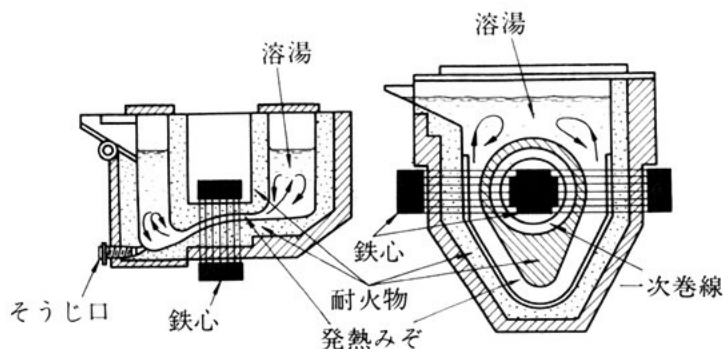
図 7　低周波誘導炉の原理

(a) 水平環溝式　(b) アジャックスワイヤット炉

図8 低周波誘導炉

すると，二次電流が断たれるので電磁力はなくなり，溶湯は元の位置にもどって回路が閉じ，再び電流が流れる。これらのことが繰り返されると，炉の温度が不安定となる。このようなことを**ピンチ効果**という。

水平環溝式　ピンチ効果を除くために，図8(a)のように，二次回路の部分を深いところにおいて，溶湯の重みでくびれができるのを防いでいる。この形のものは**水平環溝式**とよばれる。これは，構造上循環がわるく，炉が詰まりやすいため，耐火物の手入れがいきとどかないという欠点がある。

アジャックスワイヤット炉　図(b)は，鉄心をみぞにして，溶湯の二次回路を鉛直にし，湯だめを上部に設けたものである。溶湯が過熱せず，容易に流動循環するようになっている。この形のものは，**アジャックスワイヤット炉**とよばれる。

問 5.　誘導加熱の利点を述べよ。

(2) 高周波誘導炉

図9のように，炉のまわりに一次巻線（コイル；誘導子）を置き，それに 1～10〔kHz〕の高周波電流を流すと，黒鉛るつぼに誘導電流が流れ，内部の材料が融解する。この場合，るつぼの内部の材料が

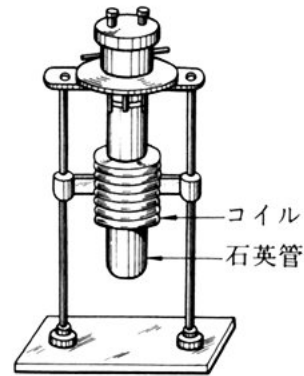
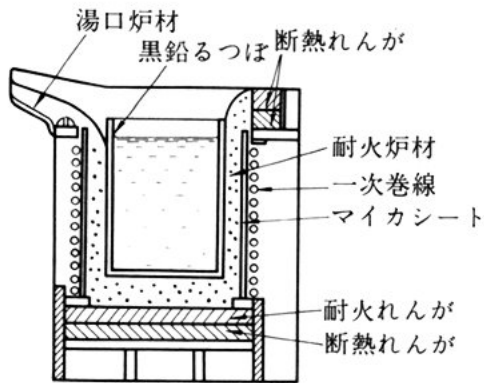



図 9　高周波誘導炉（間接誘導法）　**図 10　真空融解炉**

導電性のものでなくても加熱される。

真空炉　一般に，金属材料は，融解のときに各種のガスを吸い込み，機械的性質が低下し，鋳造の場合には，すを生ずる原因となることが多い。それで，金属の融解や鋳造の場合には，ガスを吸収しない状態で行うために，**真空融解炉**が用いられる。

真空炉には，真空そうに炭素抵抗体を収めて，熱放射によって加熱する方法，図 10 のような融解用石英管の中に黒鉛るつぼを入れ，高周波誘導加熱をする方法などがある。後者では，被熱物が金属の場合には，それ自体にも誘導電流が流れて加熱されるので，有利な方法であるといえる。

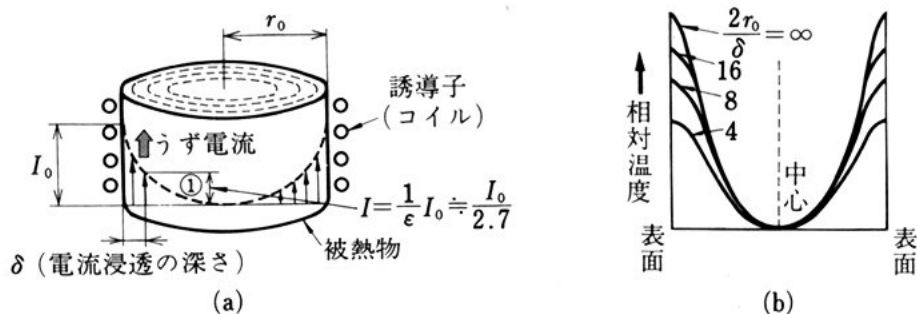
問 6.　真空炉の特徴を述べよ。

（3）　高周波焼入装置

炭素鋼の棒などを焼入れしたい場合には，これを 750〔°C〕程度の高温にし，これを急冷する。この場合，鋼の表面だけを焼入れして硬化させ，内部は焼入れしないで柔軟性をもたせる方法はないであろうか。

図 11 のように，被熱物のまわりにコイルを置き，高周波電流を流すと，表皮効果によって，被熱物には ① のような誘導電流が流れ，

(a)

(b)

ア)　電流浸透の深さδは，$\frac{I}{I_0}=\frac{1}{\varepsilon}$の点と，表面との間隔で表される。$\delta$の値は，周波数によって異なる。

イ)　$\frac{2r_0}{\delta}$が大きいほど，表面に近い部分だけが，焼入れされる。

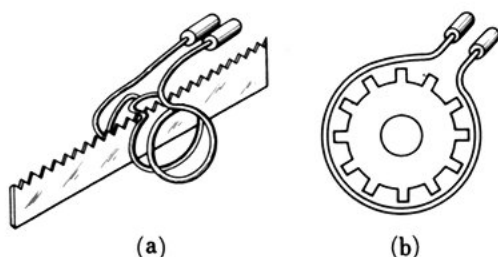
図 11　被熱物の温度分布

その温度分布は図(b)のようになる。それで，表面に近い部分ほど高温となり，急冷するとその部分が強く焼入れされる。

誘導式表面加熱　高周波焼入れは，表面に近い部分だけを焼入れすることができるので，図12(a)，(b)のように，表面だけを硬化させて耐摩耗性を高めたいときに，広く利用されている。

(a)　(b)

図 12　コイルの配置と誘導加熱

この場合，硬化層の深さは，加熱電力・加熱時間・使用周波数および，加熱対象と目的によって決める必要がある。

高周波誘導加熱は，一般に，大電力の高周波発生装置が必要であり，その熱効率が低いという欠点があるが，表面加熱ができるなどの特徴もあるので，広く利用されている。

問 7.　誘導加熱を行う例について調べよ。

3. 電気乾燥

(1) 電熱乾燥

乾燥した高温の空気を被乾燥物に当てて水分を取り去る方法は，古くから行われている。

図13は，その装置の例である。電熱を利用して空気を加熱し，乾燥した高温の空気を作り，送風機で乾燥室に送り込む。被乾燥物から水分を取り去った空気は，加熱室に返され，乾燥した高温の空気に変えられて，再び乾燥室に送られる。

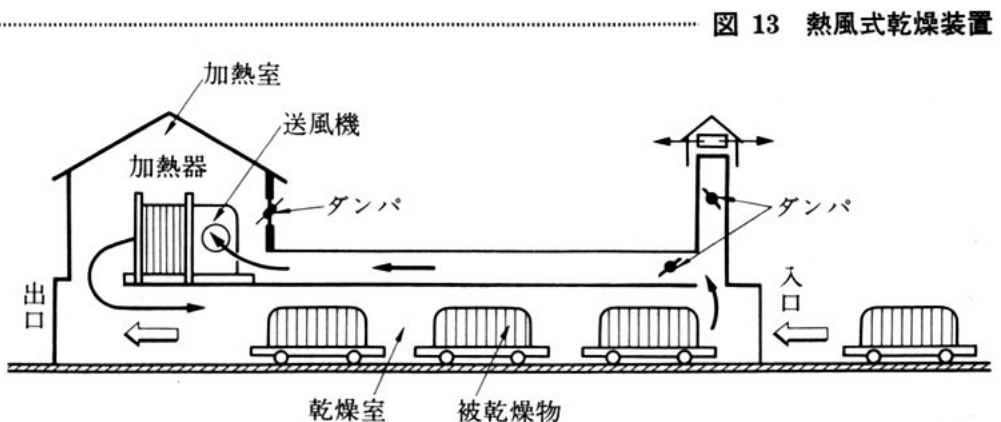
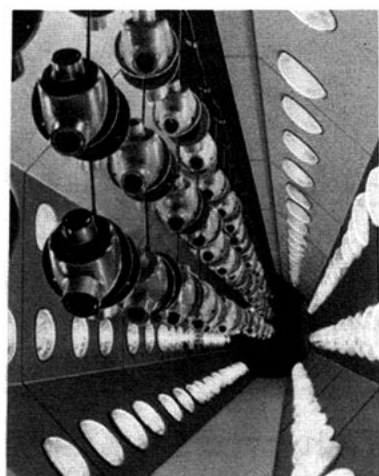
この乾燥方法は**熱風乾燥**とよばれ，空気が循環するので，循環式ともよばれる。

問 8. 乾燥には，高温の空気と送風機が必要なのはなぜか。

(2) 赤外線乾燥

衣類を早く乾燥したい場合，高温の発熱体の近くにもっていくのがよい。これは，高温物体からの放射エネルギーによって，被乾燥物の中の水分または溶剤などが，速やかに蒸発するからである。

一般に，電球のフィラメントの温度を上げるほど，放熱のうち，

図 13 熱風式乾燥装置

(a)

形　式	IR 100/110 V 375 WRH	QIR 200/220V 1000 WL
全放射束	270〔W〕以上	750〔W〕以上
放射効率	72〔%〕	75〔%〕
定格寿命	5000時間	5000時間

(JIS C 7514-1985 による)

(b) 赤外線電球

図 14　赤外線乾燥器

放射による分が多くなるので，放射加熱の効果が上がる。しかし，フィラメントの寿命を長くするために，温度を上げない方がよい。また，赤外線領域で発熱体の放射エネルギーを最大にするためには，58ページの図1からもわかるように，一般照明用電球より低い温度でよい。**赤外線電球**は，このような考え方で作られたものである。図14(a)は，赤外線乾燥器の例であり，また図(b)は，JISで定められた赤外線電球の例である。

問 9.　赤外線電球は，一般の電球に比べて寿命は長いか短いか。

（3）高周波乾燥

木材のような誘電体を電極の間にはさみ，高周波電圧を加えると，誘電体の内部で電力が消費される。この場合，消費電力量はすべて熱に変わる。発生する熱量は，電源の周波数，電界の強さの2乗，比誘電率などに比例する。このような発熱を利用するものが，**高周波誘電加熱**である。

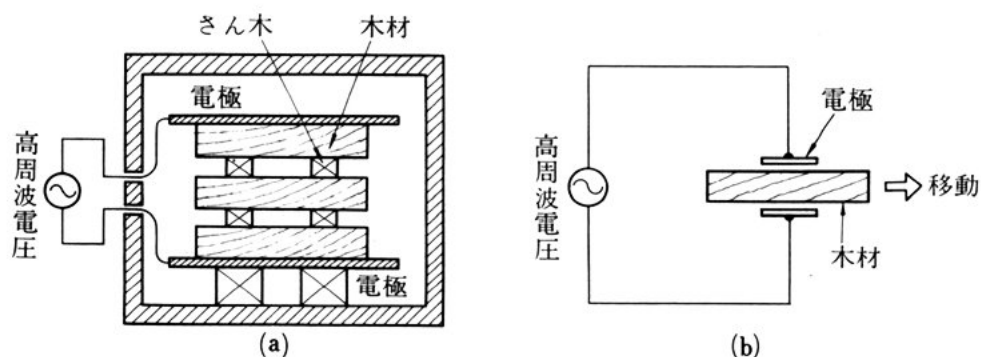



図 15　高周波乾燥装置

木材の高周波乾燥　木材は，ふつう水分をかなり含んでいるため，伐採後，自然乾燥に長い時間がかかる。これを早く乾燥させようとして，外部から熱を加えると，内部の水分の分布が偏って，木材が曲がってしまう。したがって，内部から乾燥する（加熱する）方法が考えられ，高周波加熱が用いられるようになった。

図 15(a)，(b)は，高周波乾燥装置の原理図である。内部で多量に発生した熱によって，水分は蒸気となって外部に逃げる。この場合，木材は，樹種，伐採後の経過その他によって，含水率，比誘電率なども異なる。それに応じて，乾燥装置に加える高周波電源の電圧や周波数を適当に選ぶ必要がある。

問 10． 合板，曲げ木の乾燥に高周波誘電加熱は適するか。

問　　題

1.　表1は，製鋼用アーク炉の容量と電圧・電流を示す。次の問いに答えよ。

(1)　アーク炉とはどんな炉か。この場合，電極はいくつあるか。

(2)　一次側が△結線かY結線かによって，電力は何パーセント変えられるか。

(3)　二次電圧が変えられるようにしてあるのはなぜか。

(4)　二次電圧 104〔V〕で，電流が 28370〔A〕流れていれば，力率 80〔%〕として，電力を計算せよ。

(5)　電極に黒鉛電極が用いられているのはなぜか。

表 1　製鋼用アーク炉の例

公称容量〔t〕	電力容量〔kVA〕	二次電圧〔V〕						二次最大電流〔A〕	電極直径〔mm〕	
		一次側△結線			一次側Y結線				人造黒鉛	天然黒鉛
3	1200	160	140	120	92	81	69	4330	205	255
6	2400	170	150	130	98	80	75	8150	255	355
10	3500	180	160	140	104	92	81	11230	355	455
20	6000	200	180	160	115	104	91	17320	455	—
30	9000	220	200	180	127	115	104	23620	510	—
40	12000	240	210	180	138	121	104	28370	510	—

（電気学会編「電熱工学便覧」による）

2.　抵抗炉とアーク炉を比べるとき，大容量の炉としてはどちらがよく用いられているか。

3.　直接加熱式と間接加熱式では，大容量の炉としてはどちらがよく用いられているか。

4.　誘導加熱と誘電加熱の原理上の違いを説明し，それぞれの用途を二つずつ挙げよ。

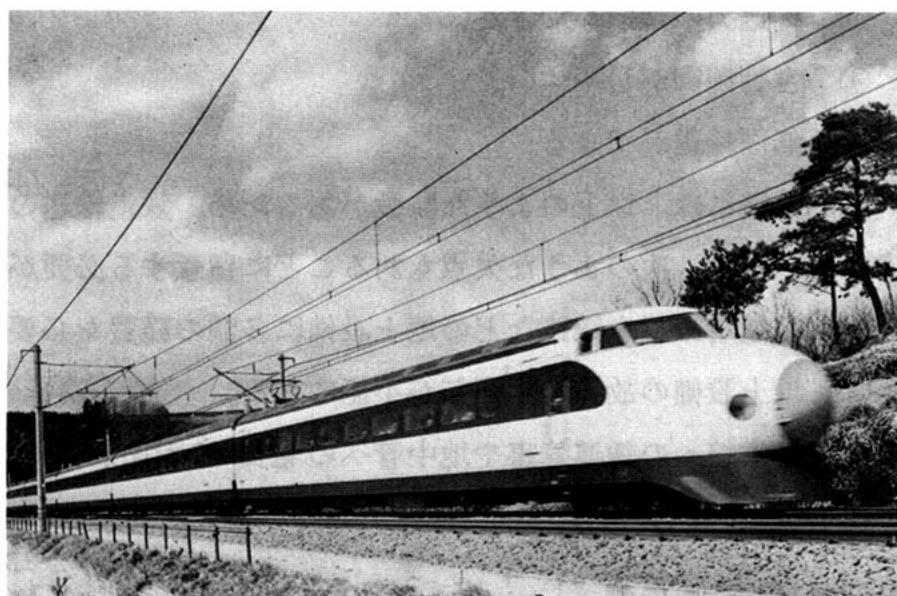
5.　ある直接式電気炉は，使用温度が 1500～2000〔°C〕であって，三相 7000〔kVA〕，電圧 90〔V〕，力率 95〔%〕であるという。材料に流れる電流，消費電力を求めよ。

第9章

電気応用

いろいろな電気現象や，その現象を利用して作った電気機械・器具類を工夫して，家庭や産業界において応用し，役だたせることを考える領域は，電気応用とよばれる。

この章では，電気鉄道への応用，電気化学への応用，その他のいろいろな応用について調べる。

電気車の例

1 電気鉄道

この節のねらい　人や物を多量に輸送するための交通機関のうち，代表的なものに電気鉄道がある。ここでは，電気鉄道の特徴・方式・電気車・信号・保安などについて調べる。

1. 電気鉄道の特徴と方式

(1) 電気鉄道の特徴

電気鉄道は，蒸気機関車やディーゼル車両による輸送に比べて，次のような特徴がある。

① エネルギーの利用効率が高い。

② 運転および取り扱いが容易である。

③ 輸送力の増強ができる。

④ 自動制御がしやすい。

⑤ 無煙輸送ができる。

電気鉄道には，以上のような特徴があるため，鉄道輸送の主流を占めているが，次のような欠点もあることに留意する必要がある。

① 変電所や電車線路などの地上設備に多額の経費を必要とする。

② 地上設備の故障で，運転が不能になる。

③ 通信線への誘導障害や地中管への**電食***のおそれがある。

---

* 大地に多くの電流が流れると，電気分解を起こし，埋設金属体を腐食（電食）することがある。

（2） 電気鉄道の電気方式

電気鉄道には，直流方式（直流電化）と交流方式（交流電化）がある。

直流方式では，600〔V〕, 750〔V〕, 1500〔V〕, 3000〔V〕などの電圧が使用されている。我が国のほとんどの鉄道では 1500〔V〕の電圧が使用されているが，架線の代わりに導電レールで電力を供給する第三レール式の地下鉄道や路面鉄道では 600〔V〕が多い。

交流方式では，初期のものは，三相交流や $16\frac{2}{3}$〔Hz〕または 25〔Hz〕の周波数の単相交流が使われたが，最近は，商用周波数の単相交流を車内で整流して，直流直巻電動機を動作させている。我が国の交流方式の鉄道で使われている電圧は，新幹線では 25〔kV〕, 在来線では 20〔kV〕である。また周波数は，線区により，50〔Hz〕または 60〔Hz〕のものが使われている。

問 1． 電気車が，蒸気機関車より輸送機関として優れている点は何か。
問 2． 最近，交流電化が進んでいるが，その特徴は何か。
問 3． 電気方式によって，電気車を分類してみよ。

2. 鉄　道　線　路

（1） 軌　　道

軌道は，その上を運転する電気車を道案内し，荷重を支えるもので，レール・まくら木・道床からなっている。図 1 (a) は，軌道の構成を示す。

レール　レールは，電気車の重量に耐え，車輪が円滑な回転をするためのもので，剛性に富み，折損や摩耗を少なくするため，0.55～0.75〔%〕の炭素を含む鋼が使われている。レールの大きさは，長さ 1〔m〕当たりの質量〔kg〕で表す。我が国では，30, 37,

(a) 軌道の構成

(b) レールの接続

(c) 緩和曲線

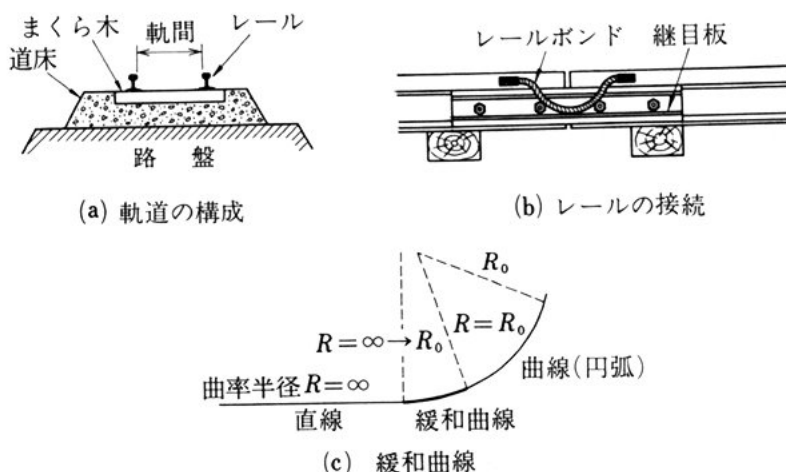



図 1 軌道の構成と緩和曲線

50, 60〔kg〕レールが使われている。レールの長さは, 25〔m〕が標準であるが, これを溶接して, 1000～1500〔m〕にした**ロングレール**も使われている。

軌　間　レール頭部の内側の間隔を**軌間**(gauge)という。軌間にはいろいろあるが, 1.435〔m〕を**標準軌間**といい, これより広いものを**広軌**, 狭いものを**狭軌**という。世界的には標準軌間が普通である。我が国では新幹線は標準軌間であり, その他は一部を除いて狭軌(1.067〔m〕)を使用している。

曲　線　軌道の曲線の度合いは, その円弧の半径〔m〕で表し, 本線では200〔m〕以上にしている。直線から曲線(円弧)に入るとき, この移り変わる部分で車両が動揺したり, ときには脱線したりするおそれがあるので, 直線と曲線(円弧)との間に, 図1(c)のような**緩和曲線**を入れる。

なお曲線部を円滑に走行させるために, 軌間を5～30〔mm〕広げている。これを**スラック**(slack)という。また, 車両が曲線部を走行するのに必要な向心力を与えるため, 外側のレールをいくぶん高くしている。この高さの差を**カント**(cant)という。カントが適当であ

れば，曲線部でも速度を落とさずに通過できるが，減速または停車することもあるので，最高 105〔mm〕程度にしている。

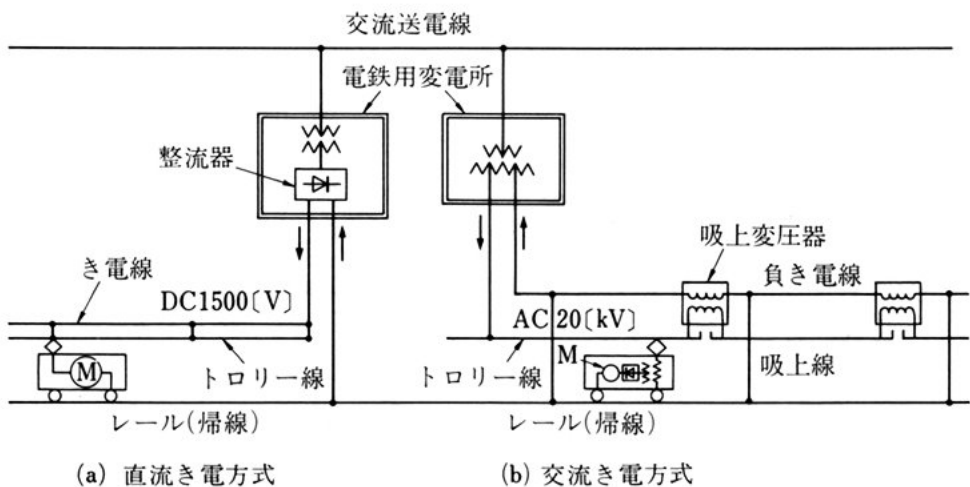
こう配　軌道のこう配は，2点間の高さの差を2点間の水平距離で割ったもので表し，**千分率（パーミル，‰）**で示される。こう配は，なるべくゆるやかな方がよく，線区により，最大 10～35〔‰〕の制限がある。

（2） 電　車　線　路

電気鉄道では，軌道に沿って設けられた**トロリー線***に，集電装置を接触させ，電流を車内に取り入れて，電気車を運転する。このトロリー線と，変電所からトロリー線に給電するための**き電線**，ならびに電気車から変電所までの**帰線**とを**電車線路**という。

き電方式　図2のように，直流電化区間では，変電所において，特別高圧の交流を受電し，変圧器で電圧を下げ，整流器によって直流に変換し，き電線を通してトロリー線や第三レールに電力を供給している。しかし，トロリー線による電圧降下や電力損失が大きい

図2 き 電 方 式

(a) 直流き電方式　(b) 交流き電方式

* 第三レール式では，第三レールまたは導電レールという。

ので，線路に沿って5～15〔km〕間隔に変電所を設け，さらにき電線をトロリー線と平行に架設して，適宜給電している。

交流電化区間では，トロリー線の電圧が高く，電流が小さいため，き電線の必要がなく，また変電所の間隔も20～70〔km〕と大きくできる。しかし，付近の通信線に誘導障害を与えるため，吸上変圧器または単巻変圧器を使って，レールに流れている帰線電流を強制的に負き電線に流している。

架線方式　架線方式には，図3に示すように，直接ちょう架式・剛体ちょう架式・カテナリちょう架式がある。

直接ちょう架式は，レール面上の高さが不均一となるが，施設方法が簡単なため，低電圧・低速度の路面電車などに利用される。

カテナリちょう架式には，図(c)の①～④のような方式がある。**シンプルカテナリ**は，基本的な方式で，普通100〔km/h〕以下の運転区間に使用される。**コンパウンドカテナリ**は，シンプルカテナリの支持点下の硬性による離線を取り除いたもので，100〔km/h〕以上の

図3 架 線 方 式

(a) 直接ちょう架式

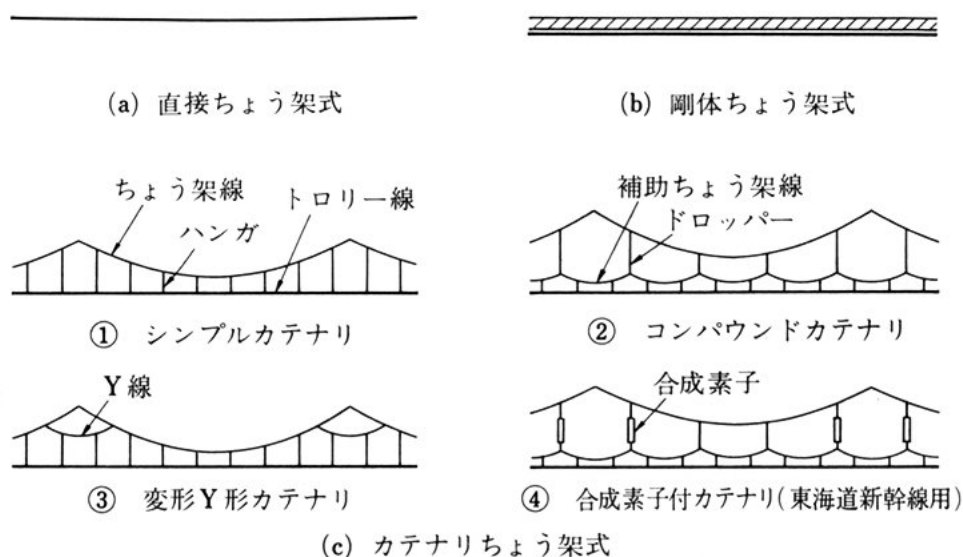
(b) 剛体ちょう架式

① シンプルカテナリ

③ 変形Y形カテナリ

② コンパウンドカテナリ

④ 合成素子付カテナリ(東海道新幹線用)

(c) カテナリちょう架式

高速度用に適する。**変形Y形カテナリ**は，シンプルカテナリの経済性にコンパウンドカテナリの高性能性を組み合わせたもので，高速鉄道に用いられる。

また，**剛体ちょう架式**は，パンタグラフ付きの電車を地下鉄道に乗り入れるために開発されたもので，トンネルに直接固定でき，断線事故がなく，保守も簡単である。

第三レール　走行レールと形状は同じであるが，電気抵抗率が銅の6〜8倍であり，走行レールに比べて導電率の大きな鋼製のレールで，走行レールの脇に絶縁して布設し，電力を供給するものである。地下鉄道などのように，人畜に対する危険が少ない場合に使われる。

帰　線　架空線式や第三レール式の電気鉄道では，帰線としてレールを利用する。レール自体の電気抵抗は $(3\sim5)\times10^{-5}$〔Ω/m〕程度であるが，その継目の抵抗が大きいから，そのまま電流を流すと電圧降下が著しいばかりではなく，大地に多くの電流が流れ，埋(まい)設(せつ)金属体を腐食（電食）するおそれがある。

このため，レールの継目には，図1(b)のように，銅より線を溶接して，継目の抵抗を小さくしている。これを**レールボンド**という。

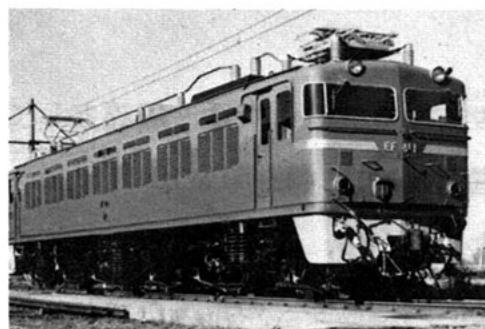
問 4.　水平距離100〔m〕につき垂直距離2〔m〕のこう配を千分率で表せ。

問 5.　直流方式の場合，電気車への電力は，トロリー線へ直接送らず，き電線を通じて給電しているという。なぜ，き電線が必要か。

3. 電 気 車

(1) 電気車の分類

電気車は，電気機関車と電車に分類でき，また外部から電力の供給を受ける方式によって，直流電気車・交流電気車・多電気方式(交直両用など)電気車などに分けられる。電気機関車はまた，高速の旅客用と，けん引力の強い貨物用とに分けられる。電車は用途により，通勤電車・長距離電車・路面電車・登山電車などがある。

図4 電 気 車

（2） 電気車の電気回路

電気車の電気回路は，図5(a)のように，主回路・制御回路・補助回路・付属回路からなっている。

主回路は，主電動機に電流を供給する回路で，直流電気車では，図(b)のように，主電動機のほかに，集電装置・制御器・主抵抗器などを含んでおり，交流電気車では，さらに主変圧器や整流器を含んでいる。

制御回路は，主回路を制御するための低圧回路であり，**補助回路**は，電動発電機・空気圧縮機などからなる回路である。また，**付属回路**は，冷暖房や照明などのサービス設備に，電流を供給する回路

図5 電気車の電気回路

(b) 主回路

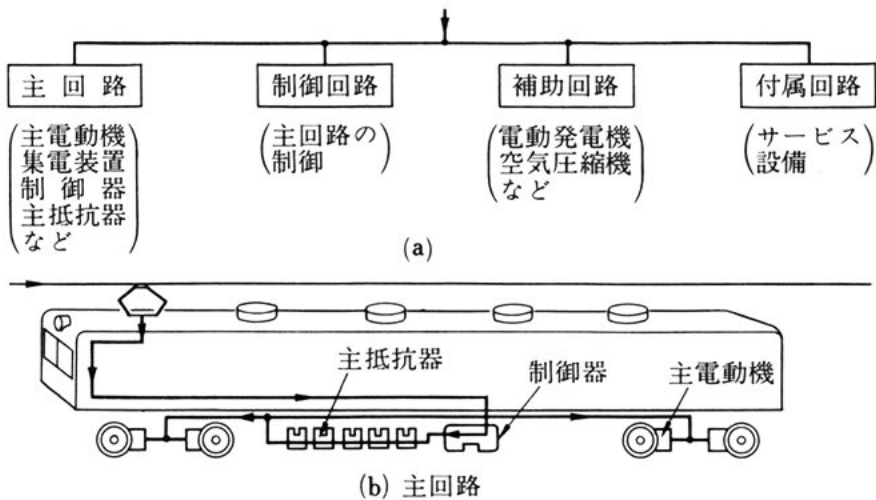
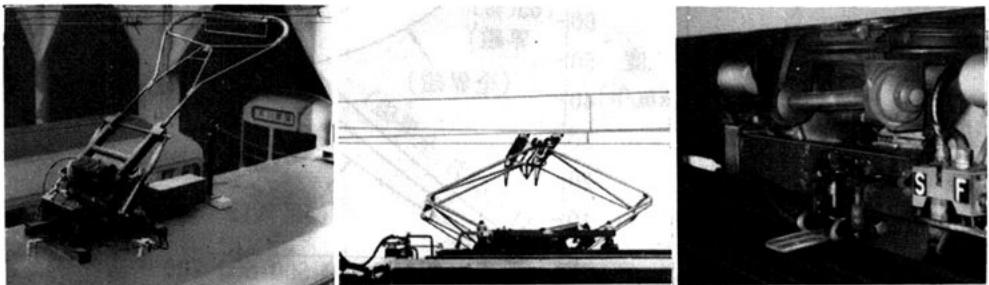



図6 集電装置

(a) ビューゲル　(b) パンタグラフ　(c) 集電靴

である。

（3） 集 電 装 置

トロリー線または第三レールから，電力を導入する装置を集電装置といい，図6に示すように，ビューゲル・パンタグラフ・集電靴(か)などがある。**ビューゲル**は，路面電車などの小形・低速度のものに，**パンタグラフ**は，主として大容量・高速度のものに使われる。また，**集電靴**は，第三レール用である。

（4） 主 電 動 機

電気車には，発車時や上りこう配では強大なトルクを出し，平たん路では高速回転し，しかも速度制御の容易な電動機が必要である。これに最も適しているのが直流直巻電動機である。交流式の場合も電気車の中のシリコン整流器で整流して，直流直巻電動機を動作させている。図7は，主電動機の特性曲線の一例である。

（5） 電気車の速度制御

電気車の速度制御法には，電圧制御法・界磁制御法・サイリスタ制御法がある。

電圧制御法　電動機に直列に抵抗器を接続し，始動時の電流を

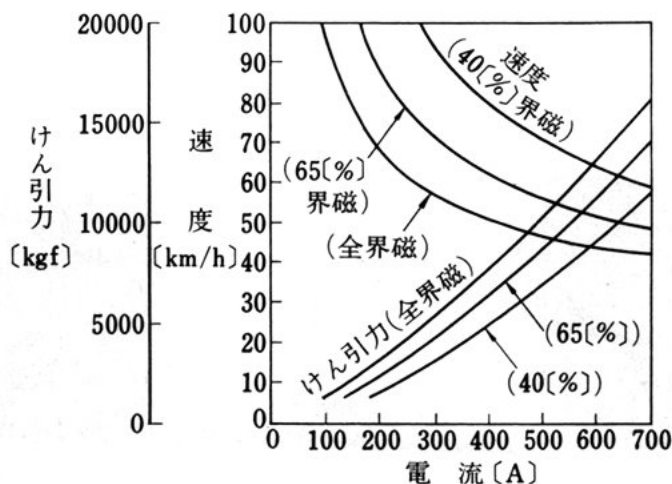
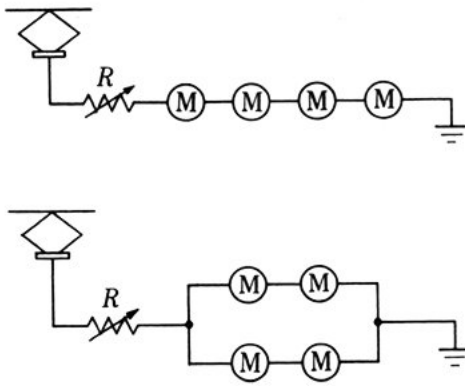
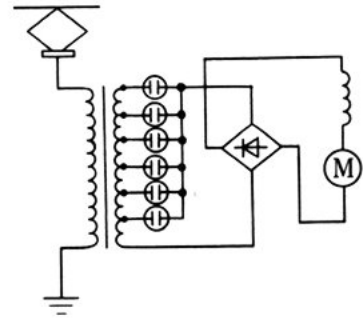
図7 力行(りっこう)特性曲線

(a) 抵抗制御法および直並列制御法（直流）

(b) タップ切り換え法(交流)

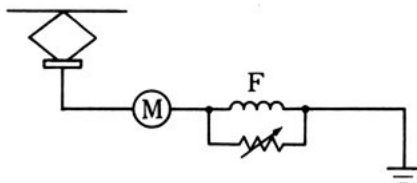
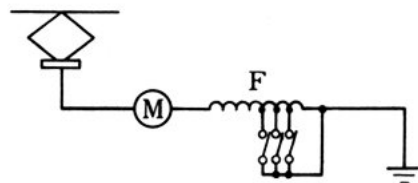
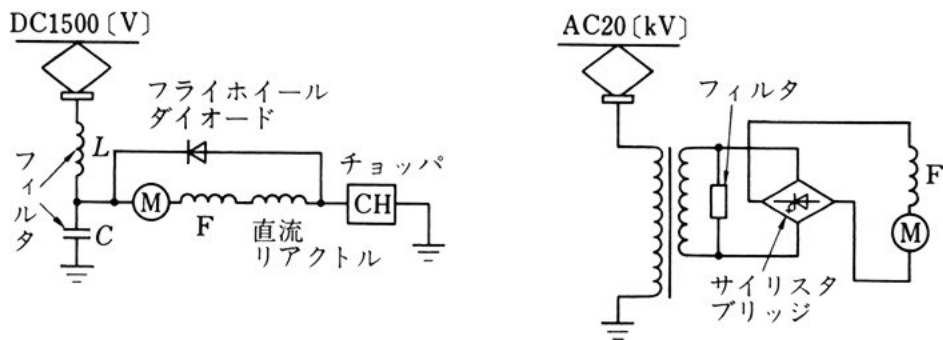
図 8　電 圧 制 御 法

制限し，速度が上昇するに従って，順次抵抗を短絡して，電動機の電流をほぼ一定に保つ。このような制御法を **抵抗制御法** という。

また，図 8 (a) のように，2 台以上の電動機を直列接続から直並列接続，または並列接続に切り換え，電機子電圧を変化させて，速度を変える方法を **直並列制御法** という。

交流電気車では，図 (b) のように，主変圧器のタップを切り換えることにより，電機子電圧を変化させて，速度制御を行っている。

界磁制御法　一定電圧のもとでは，主電動機の回転速度は，界磁の強さに反比例する。そこで，界磁の強さを弱めて，さらに高速にする方法がある。これを **界磁制御法（弱め界磁）** といい，図 9 のような界磁分路法と部分界磁法がある。

図 9　界 磁 制 御 法

(a) 界磁分路法

(b) 部分界磁法

(a) サイリスタチョッパ方式（直流）

(b) サイリスタ位相制御方式（交流）

図 10 サイリスタ制御法

サイリスタ制御法　直流電気車では，図10(a)のように，サイリスタチョッパ回路を電機子に直列に接続して，通電期間と休止期間との比を変えることにより，電機子電圧の平均値を変化させて速度制御をする。これを **電機子チョッパ** という。このほかに，界磁回路だけを対称にした **界磁チョッパ** もある。

交流電気車では，図(b)のように，主変圧器の二次側に接続したサイリスタブリッジを位相制御することによって，直流電圧を変えて，速度制御をする。

これらサイリスタ制御を用いた電気車には次のような利点がある。①主抵抗器を使わないため，発熱せず，大幅な電力節約ができる。②滑らかな電圧制御ができるので，乗り心地（ごこち）が良く，高加減速もできる。③主回路の無接点化ができるので，信頼性が高く，保守も容易になる。

これらの利点があるため，これからの電気車は，サイリスタ制御が主流になるものと思われる。

(6) 制　　動

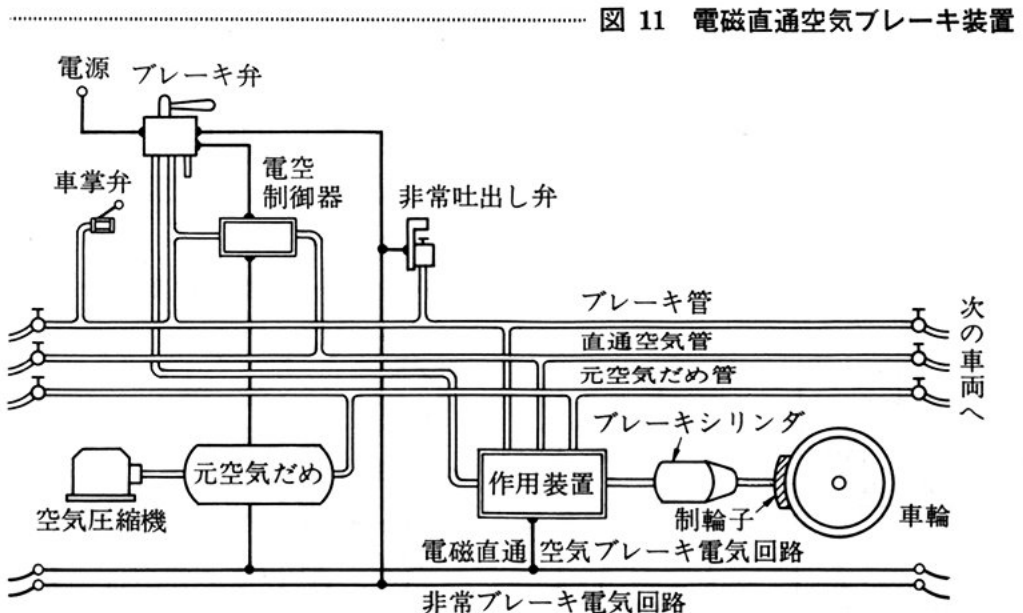
車両を安全に運転するためには，一定距離以内で確実に停車させるブレーキ装置が必要である。これには，機械ブレーキと電気ブレ

ーキとがあり，一般に両者を併用するが，万一の場合にも確実に停車させるために，3系統ないし4系統のブレーキを備えている。

機械ブレーキ　電車に現在広く使われている**機械ブレーキ**は，圧縮空気を利用した空気ブレーキである。空気ブレーキには，電磁直通空気ブレーキ・自動空気ブレーキ・非常空気ブレーキ・保安空気ブレーキなどがあり，一般にこれらのブレーキをすべて備えている。しかし，常時使用するのは，電磁直通空気ブレーキである。

電磁直通空気ブレーキは，図11のブレーキ弁を操作することにより，電空制御器より電気信号を出し，作用装置の電磁給排弁を動作させて，ブレーキシリンダの空気圧を制御し，ブレーキをかけるものである。このとき，電磁弁で各車いっせいに制御するので，長編成の車両でも，ブレーキの作動・ゆるめを早く行うことができる。

これらのブレーキは，制輪子で車輪を押し付けるものであるが，車軸にブレーキ用の円板を取り付けて，これをはさみ込む**ディスク**

図 11　電磁直通空気ブレーキ装置

ブレーキ が多く使われるようになってきた。

また，登山電車や急こう配区間用の電気機関車には，レールを電磁石で吸着する電磁吸着ブレーキも使われている。

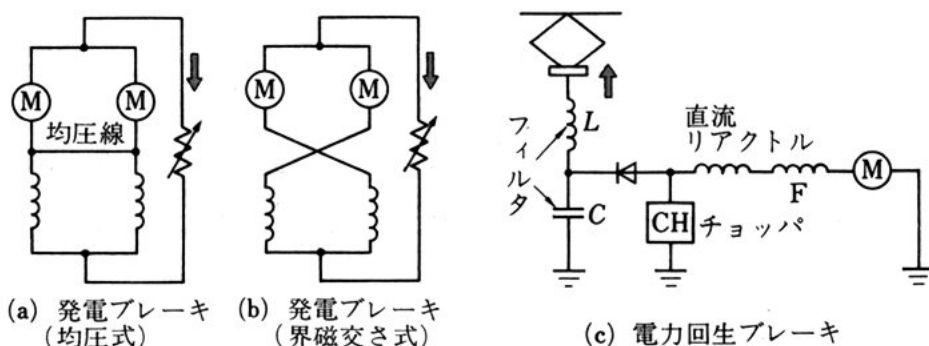
電気ブレーキ　図12のように，主電動機を直巻発電機として働かせ，その電力を主抵抗器によって熱エネルギーに変換して，ブレーキ力を得る **発電ブレーキ** と，発電した電力を電車線路に返し，他の電気車に電力を供給して，ブレーキ力を得る **電力回生ブレーキ** とがある。

電気ブレーキは，高速でのブレーキ力が大きく，制輪子の摩耗も少ないが，低速では効かないので，停車用として速度が30〔km/h〕程度以下になると，自動的に空気ブレーキに切り換わるようにしている。

また，ブレーキ力を大きくするためには，誘導電圧を大きくする必要があるので，主電動機は，定格電圧の200〔%〕ぐらいの電圧に耐えられなければならない。

電力回生ブレーキは，発電機の電圧が，電車線電圧より高くなければならないことと，ブレーキをかけたとき，他の電気車が起動または力行（りっこう）していなければならないことから，急こう配区間で使われていた。しかし，発熱せず，経済的効果も大きいので，運転密度の

図12　電気ブレーキ

(a) 発電ブレーキ（均圧式）　(b) 発電ブレーキ（界磁交さ式）　(c) 電力回生ブレーキ

高い地下鉄や通勤電車にも使われるようになってきた。

問 6. 電気車の主電動機には，どんな特性が要求されるか。

問 7. 直流電気車の速度制御法には，どんな方法があるか。

問 8. サイリスタを利用した電気車が増えてきたが，なぜか。また，サイリスタは，電気車のどんなところで使われているか。

問 9. 電気車に使われているブレーキの種類を挙げよ。

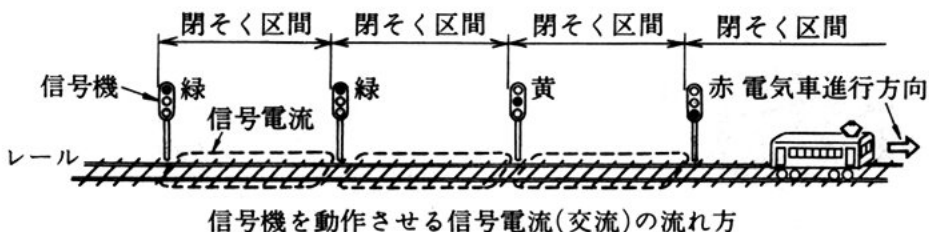
4. 信号・保安

(1) 信号と閉そく

電気車を安全に運転するためには，電気車が互いに一定の間隔を保って走る必要がある。運転速度の速い電気車は，制動距離も長いので，衝突事故などを起こさないように，閉そく区間を設ける。

閉そく区間は，運転線路をいくつかの区間に分け，それぞれの区間には，必ず1電気車しか運転しないようにしたものである。閉そく方式を確実に行うように注意しても，人間にはときに錯覚や間違いがあるので，それを避けるため，電気的に信号装置を動作させるようにしたものに，閉そく信号方式がある。図13は，**閉そく信号方式**に用いられる信号電流の流れ方を示す。この閉そく信号方式では，レールに信号電流を流すので，電気車電流（直流）と区別するため，

図 13 閉そく信号方式

信号機を動作させる信号電流(交流)の流れ方

50～60〔Hz〕(商用周波数) の交流が用いられている。

(2) インピーダンスボンド

図13の信号電流は，閉そく区間内だけを循環し，他の閉そく区間に流れてはならないから，閉そく区間の境界にあるレールは，絶縁しなければならない。しかし，電気車電流は，レールを帰線としているので，変電所までレールが接続されていなければならない。このために，閉そく区間の境界には，図14のようなレール間を絶縁する **絶縁継目板** と **インピーダンスボンド** が設置されている。

インピーダンスボンド内の構造は，図14(d)のようになっている。レールを帰線とする電気車電流（直流）は，図(d)の①，②からコイルに入り，コイルの中点で合流し，⑤を通り，次のコイルに入り，左右に分かれ，③，④から次の区間に流れる。また，図14のように，各閉そく区間ごとに一つの閉回路を構成している信号電流は，図14(d)の①，②間を流れるが，隣接する閉そく区間の③，④とは閉回路を構成しないので，信号電流は⑤を流れない。

(3) 閉そく信号機のしくみ

図15のように，高圧配電線からの3300〔V〕または6600〔V〕の

図14 インピーダンスボンドと絶縁継目板

(a) 電気車電流の流れ方　(b) 信号電流の流れ方

(c) 絶縁継目板　(d) インピーダンスボンドの結線

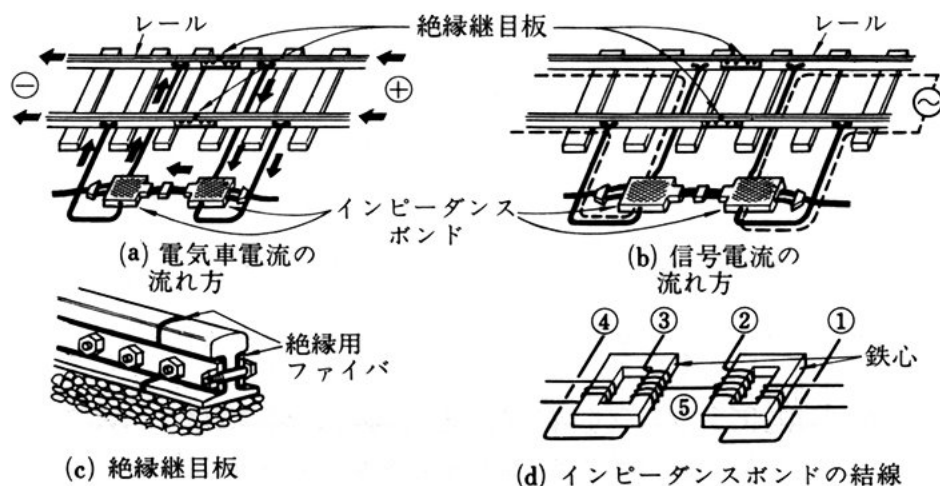
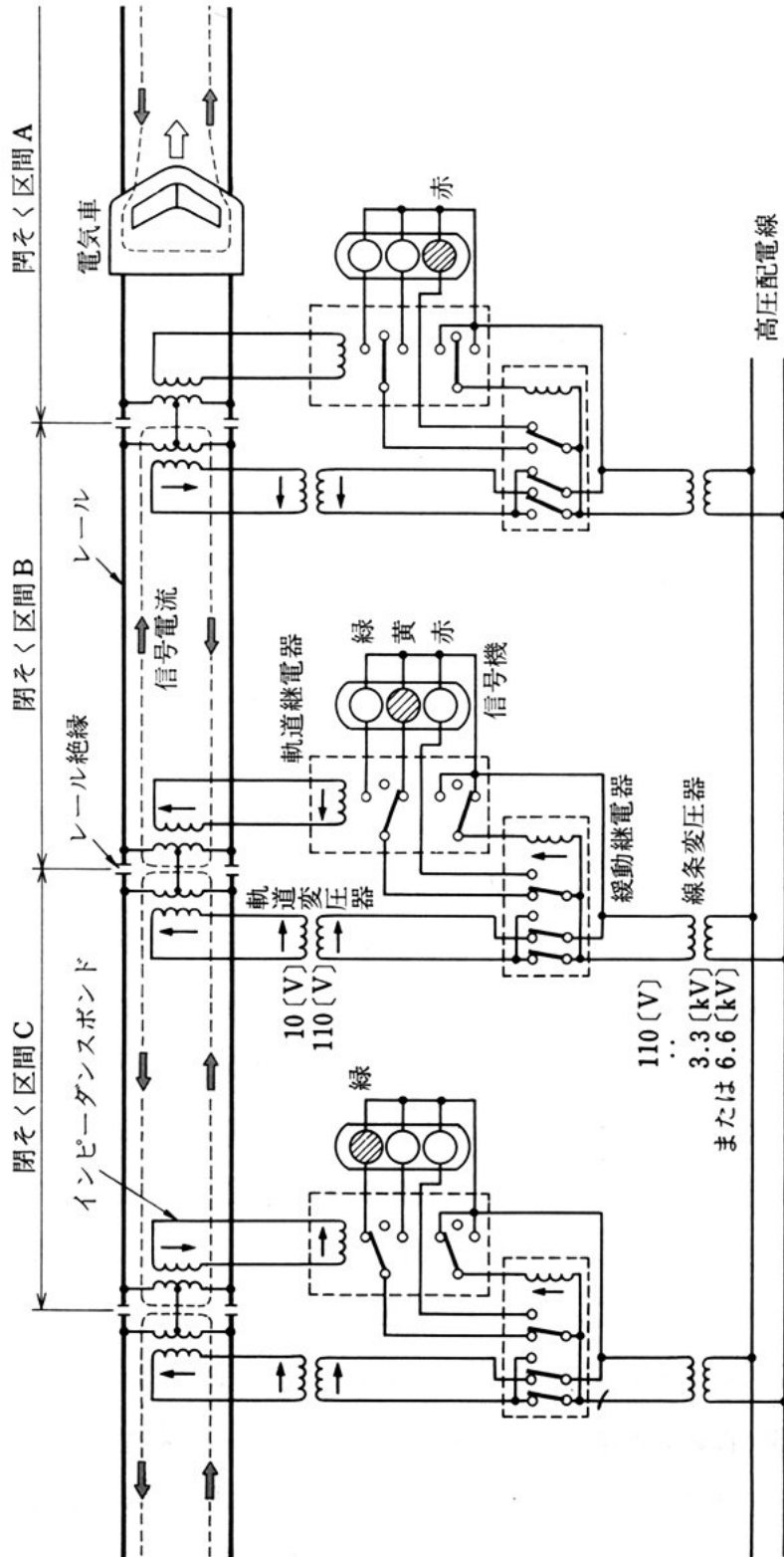



図 15 直流電化区間の閉そく信号機のしくみ

電圧を，各閉そく区間ごとに設けられた**線条変圧器**によって 110〔V〕に下げ，それをさらに，**軌道変圧器**によって約 10〔V〕に下げ，この電圧を，インピーダンスボンドを通して，それぞれの閉そく区間に加え，つねに電流を流しておく。

閉そく区間Cのように列車がないと，信号電流によって軌道継電器ならびに緩動(かんどう)継電器が動作し，進行信号（緑）を表示する。また，閉そく区間Aのように列車があると，信号電流が短絡され，軌道継電器のコイルは励磁されず，接点は中立位置となる。したがって，緩動継電器も励磁されず，接点は右側に切り換わり，停止信号（赤）を表示する。このとき軌道変圧器の極性を反転するため，次の区間の信号電流の極性も反転し，閉そく区間Bの軌道継電器は下方に閉じ，注意信号（黄）を表示する。

（4） 自動列車制御装置

列車を安全に運転するために，閉そく信号機を設けて衝突を防止している。しかし，高速度の列車を高密度で運転するようになると，ちょっとした間違いが重大な事故につながる。そのため，人間の注意力や判断力にたよるということはせず，保安度を高めるシステムが必要になり，しだいに各種の自動列車制御装置が使われるようになってきた。これらのシステムの制御方式には，ある地点で地上信号を車上へ瞬間的に伝える**点制御式**と，軌道回路を通してつねに制御信号を車上に伝える**連続制御式**とがある。また，信頼度を上げるため，システムを二重または三重にし，さらに万一故障した場合には，必ず安全側に動作する**フェイルセイフ方式**を採用している。

ATS（自動列車停止：Automatic Train Stop）装置　信号機の手前に地上子を置き，赤信号のときは 130〔kHz〕の周波数を出している。この上を列車が通過すると，車内の警報器が動作し，一定時

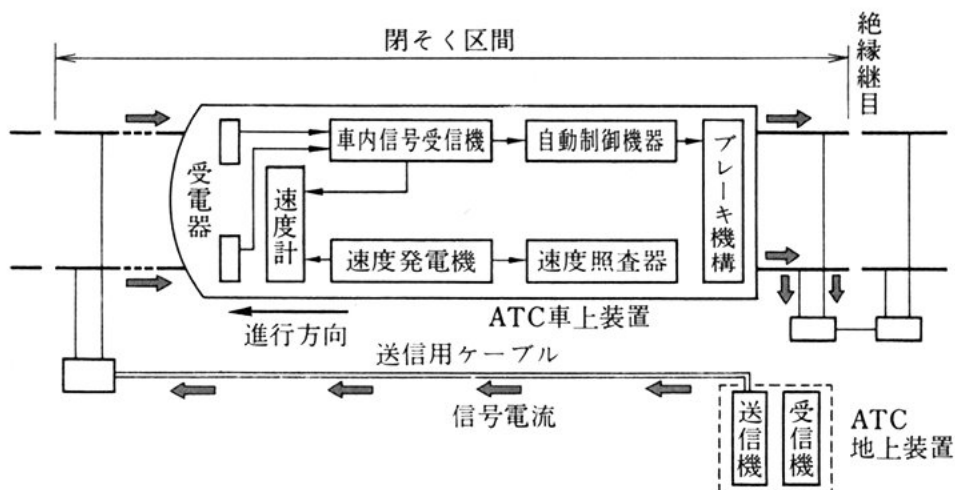



図 16　A　T　C

間以内に確認のボタンを押さないと，自動的に急ブレーキがかかる装置である。

これは点制御方式であり，設備費が少なく，地上の制御回路が簡単で，列車の動力方式に関係なく使用できる利点がある。

5　**ATC**（**自動列車制御**：Automatic Train Control）**装置**　ATS 装置を一歩進めた装置で，図 16 のように，地上装置より先行列車や線路条件に応じた信号をつねに車上装置に伝達し，運転室内に表示するとともに，列車の速度をこの信号の指示する速度と絶えず比較し，自動的に減速制御を行い，列車運転の安全を高める装置である。

10　これは連続制御式であるため，地上信号の変化に即応して，能率的な運転ができることと，制御回路を常時励磁式にして，故障時には，安全側に作用させることができる利点がある。

図 17 は，東海道新幹線における ATC による制動曲線の一例である。軌道は約 3〔km〕ごとの制御区間に分割されており，先行列車
15　に後続列車が約 6〔km〕の距離まで近づき，160 信号区間に進入すると自動的に減速され，速度が 160〔km/h〕以下になるとブレーキがゆるむ。次に，30 信号区間に入ると 30〔km/h〕以下まで減速さ

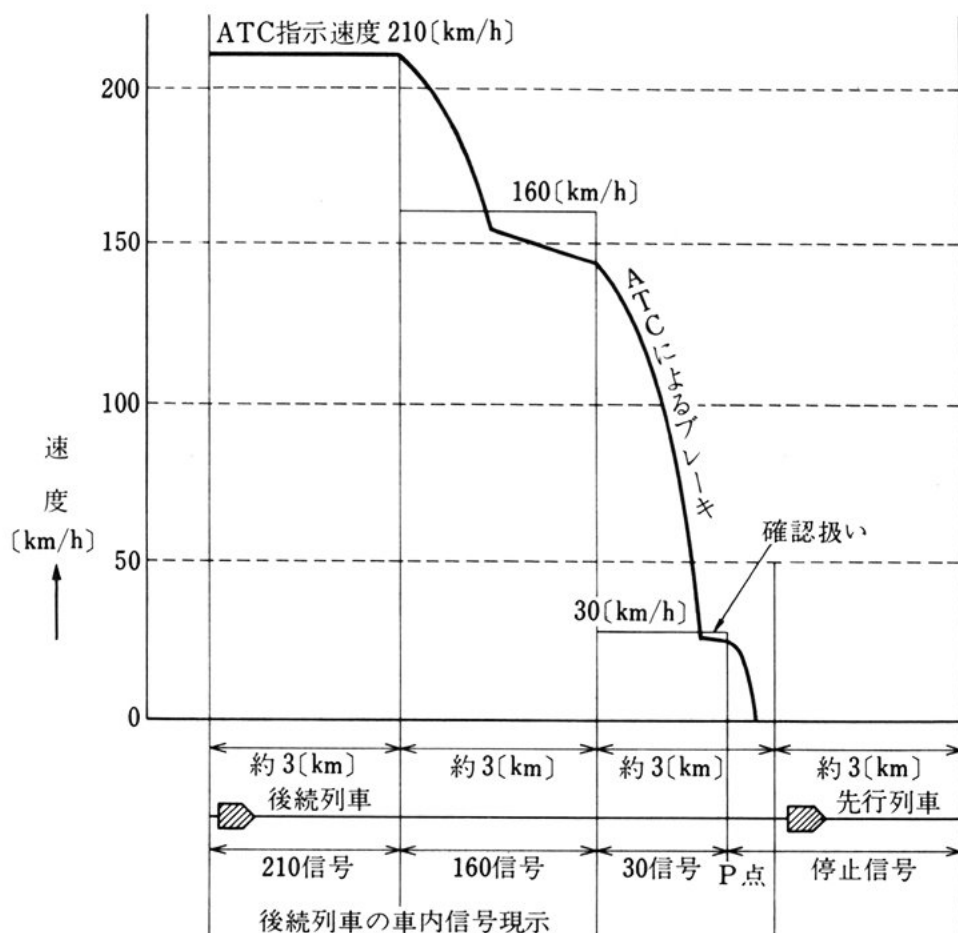



図 17　**ATC による制動曲線**（東海道新幹線）

れるが，30 信号の場合には，運転士の確認扱いがなければ，ブレーキはゆるまない。確認扱いをするとブレーキはゆるみ，30〔km/h〕以下の速度で進行できるが，P 点（先行列車のいる区間の約 100〔m〕手前）に達すると，自動的にブレーキがかかり停車する。

ATO（**自動列車運転**：Automatic Train Operation）**装置**　ATC の機能は減速制御だけであるが，これに加速制御機能などを付け加えて，列車の運転をすべて自動的に行おうとするもので，ATC 信号および列車位置検知装置の信号を基に，コンピュータに記憶されている走行パターンのうち，最適のパターンに従って，力行・惰行および減速制御を行い，所定の位置に正しく停止させる装置である。

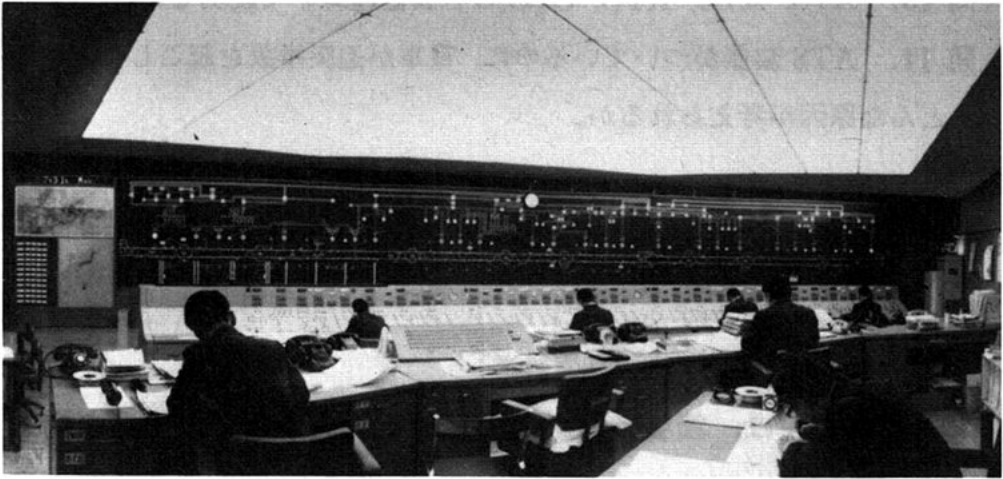



図 18　CTC 装置（新幹線東京総合指令所）

CTC（列車集中制御：Centralized Traffic Control）装置　保安度の向上や列車運行の合理化，あるいは職員の節減などのために，ある線区内の信号機やポイントおよび列車の運行を1か所で集中管理することをCTCといい，通常コンピュータで管理している。

CTC装置には，表示盤と制御盤とがあり，列車指令員は，表示盤に表示されている列車やポイントを見ながら，運転状況を監視する。

CTC装置とATC装置あるいはATO装置を組み合わせることにより，高速の列車をより安全で能率的に運転することができる。とくに運行が乱れた場合，これを復元するための最適運転指令など，列車群の流れに対する総合運転制御が容易にできる。

東海道・山陽新幹線では，東京にある総合指令所（図18）が，全線約1100〔km〕の管理をすべて行っており，緊急の場合には，列車無線で乗務員と連絡をとり，直接指示することができる。

問 10.　閉そく信号方式とはどんな方式か。

問 11.　インピーダンスボンドについて説明せよ。

問 12.　軌道変圧器が故障したら，信号機の表示はどうなるか。また，緩動継電器のコイルが断線したらどうなるか。

問 13.　ATS, ATC, ATO, CTC の各装置について説明せよ。

問 14.　ATS 装置がついているのに，電車が追突事故を起こしたという。どんな原因が考えられるか。

5. 特　殊　鉄　道

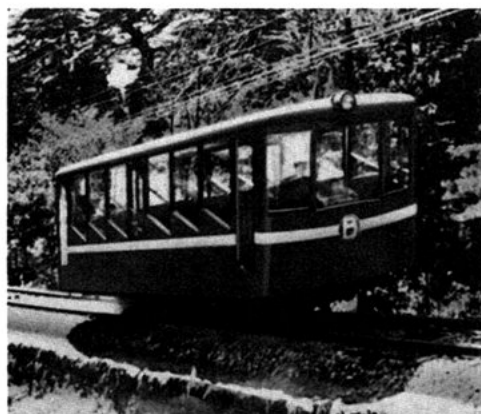
（1）　ケーブルカー（鋼索鉄道）

ケーブルカーは，鋼製ロープの両端に車両をつなぎ，山上の巻上機により車両を交互に上下させるもので，こう配 600〔‰〕程度までの山岳鉄道に使われている。巻上機には三相誘導電動機を使い，速度は 10〔km/h〕前後である。ブレーキは巻上機でかけるが，ロープの切断など非常の場合には，自動的に制動子がレールを締め付けて停止させるようになっている。

（2）　ロープウェー（普通索道）

ロープウェーは，空中に張った鋼製ロープに搬器（はんき）（ゴンドラ）をつり下げ，別のロープで搬器を引いて旅客や荷物を運ぶものである。深い谷や山を越えての建設が簡単にでき，展望も良いので観光に絶

図 19　ケーブルカー

図 20　ロープウェー

好である。

これには，2個の搬器をつるべ式に交互に上下させる**交走式**と，多数の搬器を一定間隔で送り出す**循環式**とがある。交走式は，比較的大きな搬器を作れるが，2個しかないため，長距離では輸送力が著しく低下する。循環式は，10人程度のゴンドラであるが，1分間隔ぐらいで次々に出発でき，長距離でも輸送力の低下がない。

速度は3.5～13〔km/h〕程度で，事故のときは，ゴンドラの底を開いて，なわばしごで旅客を降ろすようになっている。

(3) モノレール

モノレールは，一本の軌道を用いて車両を走行させるもので，走行軌条に車両がまたがった状態で走行する**跨座式**(こざ)と，つり下がった状態で走行する**懸垂式**とがある。

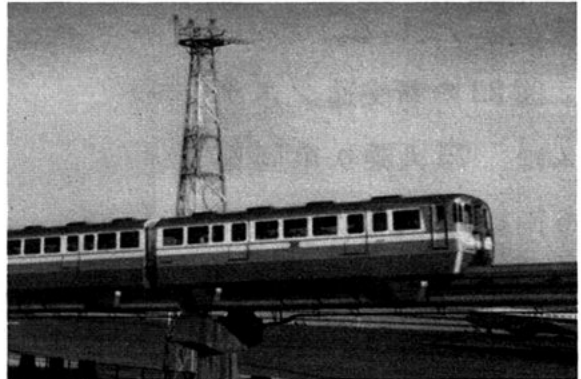



図21 モノレール

モノレールは，河川や道路上に敷設でき，建設費が安く，脱線や踏切事故の心配がないので，大都市の中量輸送の交通機関として期待されている。しかし車両の保守点検が困難であり，交差や分岐が複雑になるなどの欠点がある。

図21のモノレールは，127人乗りの車両を4～6両編成とし，最高速度80〔km/h〕で13.0〔km〕の距離を15分で結んでいる。電圧は，直流750〔V〕で，直流直巻電動機により，窒素ガス入りゴムタイヤ車輪を駆動している。

（4） 新交通システム

新交通システムとは，ニュータウンなどから鉄道駅まで，利用者数1日6～7万人の中量輸送を目的に，専用の高架U字形コンクリート軌道を敷設し，案内輪付きゴムタイヤ式電車を，高密度で自動運転しようとするものである。

案内方式には，案内レールを軌道の両側に設けた両側案内方式や片側案内方式・中央案内方式などがある。分岐には，案内レールを上下させる浮沈式や，分岐案内輪による可動案内板式などがある。

新交通システムは，建設費が地下鉄よりはるかに安いうえに，騒音が少なく，大気汚染の心配もない。また，コンピュータによる中央集中管理方式により，駅を含めた無人運転をめざして，経費の軽減を図っている。

図22の新交通システムは，75人乗り車両を6両編成にし，最高速度60〔km/h〕，最小運転間隔2分30秒で，ATC，ATO装置により，全自動運転をしている。電圧は三相600〔V〕で，側壁の3本の剛体架線より集電し，非常ドアを開けて乗客が軌道上に降りると，自動的に電車線路が停電し，安全に避難できるようになっている。また，駅のプラットホームは，ガラス張りの仕切り壁で囲まれ，車両のドアと連動して

図22 新交通システム

動くドアが設けられており，乗降客の転落や接触を防止している。

（5） 浮上式鉄道

超高速列車の開発は，人類の夢である。しかし，従来の車輪とレールによる鉄道では，高速になると騒音や振動が激しく，脱線の危険もあるため，実用上 300〔km/h〕程度の速度が限界である。

そこで，これ以上のスピードを出すために，リニアモータにより推進する浮上式鉄道（リニアモータカー）が研究されている。

車体浮上方式には，空気浮上方式と磁気浮上方式とがある。フランス・イギリス・アメリカ合衆国などでは，空気浮上方式の実験が行われ，フランスでは，ジェット機関を使って推進し，422〔km/h〕の速度を記録したが，騒音などにより実用化できなかった。

一方，車両と走行路に永久磁石を並べ，その反発力で浮上させるいわゆる磁気浮上方式が考えられるが，経済的になりたたない。そこで，図 23 のように，車上に強力な電磁石を置き，地上にはただコイルを並べるだけにして，列車が通過するときだけ電磁誘導作用により，地上コイルを電磁石にする方式が実用化されてきた。この浮上方式は，高速になるほど浮上力が増加するという特徴がある。

図 23　誘導反発形磁気浮上の原理

(a) 車上の電磁石と推進用地上コイルとの間に推進力が生ずる。

(b) 1ピッチ進んだら、推進用地上コイルの電流を反転させる。

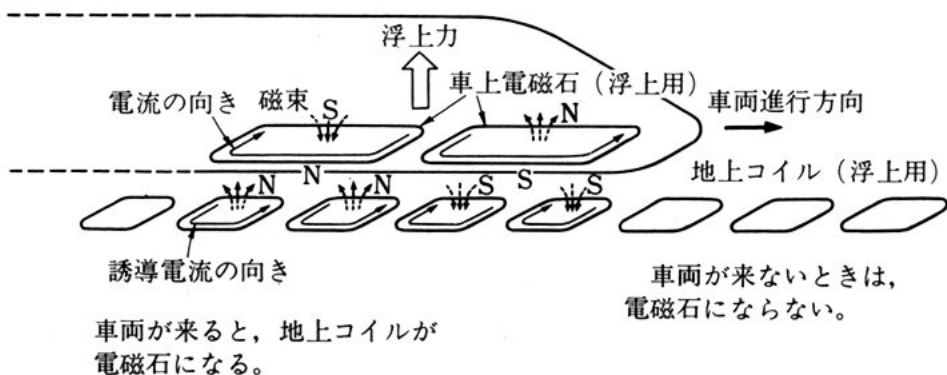
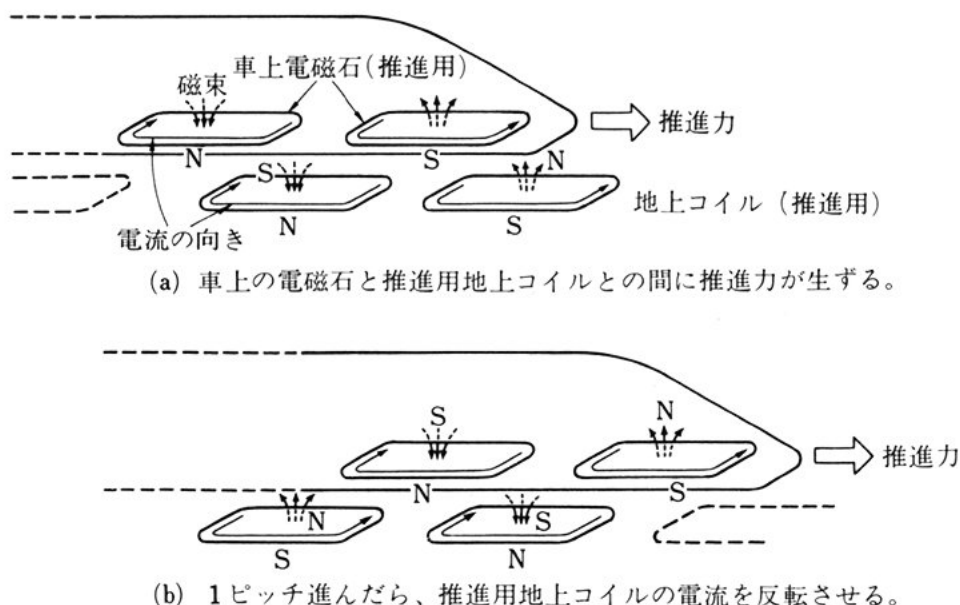



図 24 リニア同期電動機の原理

この場合，吸引方式と反発方式とがあるが，吸引方式では放置すると吸着してしまい，浮上高さも約1〔cm〕しかとれない。これに対して反発式は，約10〔cm〕の浮上高さが取れるうえに，構造が簡単な利点がある。

直線運動をする電動機（**リニアモータ**）としては，リニア誘導電動機（LIM）・リニア同期電動機（LSM）などが考えられる。

リニア同期電動機は，図24のように，固定子に相当するコイルを地上に固定し，変電所より電力を供給して，車上の回転子に相当する電磁石に推進力を与えるものである。推進用地上コイルには，列車が来たときだけ電流を流すが，その周波数を変えることにより，速度制御を行うことができる。

浮上式鉄道は，乗り心地が良く，騒音・振動の少ない安全な超高速列車であり，非接触方式であるため，摩耗部分が少なく，保守業務が大幅に軽減されるため，大都市間の交通機関として，実用化が

期待されている。

旧国鉄の技術研究所では，1962年ごろからリニアモーターカーの研究を始め，1979年12月に，無人の超電導磁気浮上LSM推進実験車ML-500により，517〔km/h〕の速度を達成した。

5 これには，液体ヘリウムで9.5〔K〕以下に冷却した，ニオブとチタンの合金製コイルに約800〔A〕の電流を流した，超電導電磁石が使われた。これは，500〔km/h〕の超電導磁気浮上リニアモーターカーの研究開発をしている，アメリカ合衆国・ソ連・イギリス・カナダを始め，世界各国の注目を集めた。

10 **問 15.** 交走式ロープウェーと循環式ロープウェーを比べ，それぞれの長所・短所を比較せよ。

問 16. 大都市内またはその周辺部の中量輸送に適する交通機関には，どんなものがあるか。

問 17. 新交通システムについて説明せよ。

問　　題

1. 次の電気車に供給される電圧は何ボルトか調べてみよ。
(1) 直流電車　(2) 路面電車　(3) 地下鉄電車
(4) 新幹線　(5) 交流電車（在来線）
2. スラックとカントについて説明せよ。
3. 電食とはどのような現象か。電気鉄道では，電食による被害にどんなものがあるか。また，電食が生じないようにするには，どんな工夫がされているか。
4. 交流電化区間における変電所の間隔は，直流電化区間における変電所の間隔より大きくとってある。なぜか。
5. 電気車の集電装置として，ビューゲルに対してパンタグラフはどんな点で優れているか。
6. 東海道新幹線には，60〔Hz〕の交流が供給されているが，主電動機は直流電動機と交流電動機のどちらが使われているか。
7. 電気車の速度制御には，どんな方法があるか。
8. 電気車の主電動機の界磁の強さと，速度・けん引力との間にはどんな関係があるか。
9. 電力回生ブレーキは，どんなところで使われているか。
10. 直流電気車と交流電気車の主回路の構成をかけ。
11. フェイルセイフ方式とはどんな方式のことか。
12. ケーブルカーとロープウェーの長所・短所を比較してみよ。
13. 浮上式鉄道について説明せよ。

2 電気化学

この節のねらい　これまでに,「電気基礎」で電気現象と化学作用との間に興味深い関係があり,それらの間に,一定の法則が発見されていることを学んだ。ここでは,電池・電気めっき・電解化学工業・電熱化学工業について調べる。

1. 電　池

(1) 各種の電池

電池には,表1のように,放電だけの**一次電池**,充放電の可能な**二次電池**,そのほか直接発電の燃料電池などがある。

一次電池には,ルクランシェ電池から発展した**マンガン乾電池**があり,広く使われている。このほかに,アルカリ電解液を用いた高負荷用の**アルカリマンガン電池**,小形で放電容量が大きく,電圧変動の少ない**水銀電池**や**酸化銀電池**などがある。

二次電池には,従来はほとんど**鉛蓄電池**が使用されていたが,最近では**アルカリ蓄電池**の進歩がめざましく,実用化が進んでいる。

新しい電池としては,**燃料電池**がある。これは,燃料のもつ化学エネルギーを電気エネルギーに直接変換するものである。このほか,直接発電として,**太陽電池**がある。これは,太陽光をシリコン半導体に照射して,太陽光の光エネルギーを電気エネルギーに直接変換するものである。

起電力を生じる化学反応にあずかる還元剤および酸化剤を**活物質**といい,その還元剤を**負極活物質**,酸化剤を**正極活物質**という。

表 1　主な実用電池

種類		構成 (負極活物質 | 電解液 | 正極活物質)	起電力〔V〕	特徴・用途
一次電池	マンガン乾電池	Zn | $NH_4Cl \cdot ZnCl_2$ | MnO_2	1.5	最も安価，広く使われている。
	アルカリマンガン電池	Zn | KOH | MnO_2	1.5	マンガン乾電池より特性が良い。
	水銀電池	Zn | KOH | HgO	1.3	軽負荷向き，電圧が一定，電子機器用。
	酸化銀電池	Zn | KOH | Ag_2O	1.5	高負荷向き，電圧が一定，電子機器用。
	リチウム電池	Li | $LiClO_4$ | $(CF)_n$	2.8	エネルギー密度大。
	空気電池	Zn | $NH_4Cl \cdot ZnCl_2$ | O_2	1.3	減極剤として空気を使用する。通信用。
二次電池	鉛蓄電池	Pb | H_2SO_4 | PbO_2	2.0	安価，自動車用蓄電池
	アルカリ蓄電池	Cd | KOH | NiO(OH)	1.35	長寿命，鉄道車両，非常灯
燃料電池	酸素－水素燃料電池	H_2 | KOH | O_2	1.0	電極寿命が短い。
	ヒドラジン－空気燃料電池	$N_2H_4 \cdot H_2O$ | KOH | O_2	1.0	構造が簡単である。

問 1.　乾電池の中でいちばんよく使われているものは何か。その理由を述べよ。

(2)　燃 料 電 池

エネルギーの中で最も使いやすいものは電気エネルギーである。この電気エネルギーをいかにして効率よく得るかということが，現在の重要な課題となっている。

表2は，現在の主な発電方式を比較したものである。最も実用化の進んだ火力発電でも効率は40〔%〕程度である。そこで，公害の少ない直接発電として，効率の高い燃料電池が注目されている。

燃料電池は，水素やヒドラジンなどの燃料を電気化学的に酸化させ，そのとき生じる化学エネルギーを電気エネルギーに変換して取

表 2　主な発電方式と効率

発電方式	エネルギーの変換過程	効率〔%〕
汽力発電	熱→機械→電気	30～42
内燃力発電	熱→機械→電気	20～35
燃料電池	化学→電気	50～70
太陽電池	光→電気	5～10
MHD 発電	熱→電気	～55（推定）

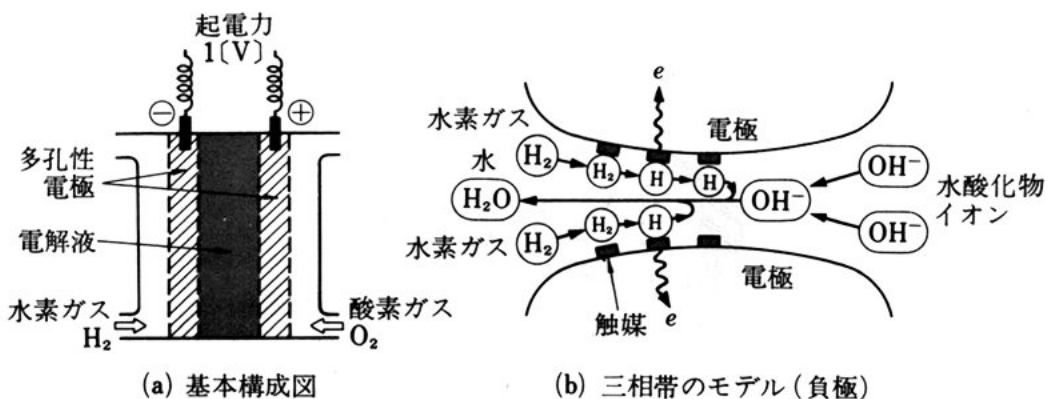
り出すものである。

図 1 (a) は，**酸素-水素燃料電池**の例である。気体は通すが液体は通さないような小さな孔(あな)がたくさんあいた電極（固相）を二つ使い，正極には酸素ガス，負極には水素ガス（気相）が供給されている。電解液（液相）は化学反応を促進させるためのもので，かせいカリ（KOH）溶液が使われる。

負極では，水素ガスが電極内の細孔を通って，図 (b) のように電極に添加されている触媒に吸着され，活性化された水素原子となる。これが水酸化物イオンと反応して水となり，そのときに生じた電子は負極に移動する。

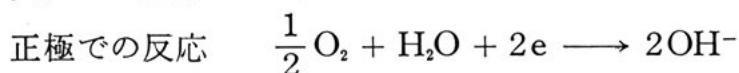
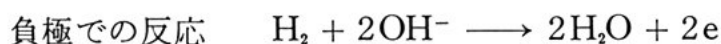
この反応は，固相（電極）・液相（電液解）・気相（燃料）が互いに

図 1　酸素－水素燃料電池の原理

(a) 基本構成図　　(b) 三相帯のモデル（負極）

接している**三相帯**とよばれる部分で起こる。各電極での反応は，次のようになる。

負極での反応　$H_2 + 2OH^- \longrightarrow 2H_2O + 2e$

正極での反応　$\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e \longrightarrow 2OH^-$

全電池反応としては　$\frac{1}{2}O_2 + H_2 \longrightarrow H_2O$

これらの反応は，燃料としての水素が燃焼する反応と変わらない。

問 2.　燃料電池と乾電池の違いを述べよ。

問 3.　燃料電池の三相帯について説明せよ。

(3)　水　銀　電　池

水銀電池は，図2のような構造になっている。負極は，亜鉛粉末(Zn)に少量の水銀を加え，アマルガム化して，加圧成形したものである。正極には，減極剤の酸化水銀(HgO)と，導電性を与えるための黒鉛粉末とを混合して，加圧成形したものが用いられる。

電解液は，40～50〔%〕のかせいカリ(KOH)溶液に亜鉛華(ZnO)を飽和させたもので，吸収材である繊維状綿紙に含ませて用いる。容器は，ニッケルめっきした鉄の缶で，液が漏れないように密閉した構造になっている。

図3は，水銀電池とマンガン乾電池の端子電圧が，放電に伴って

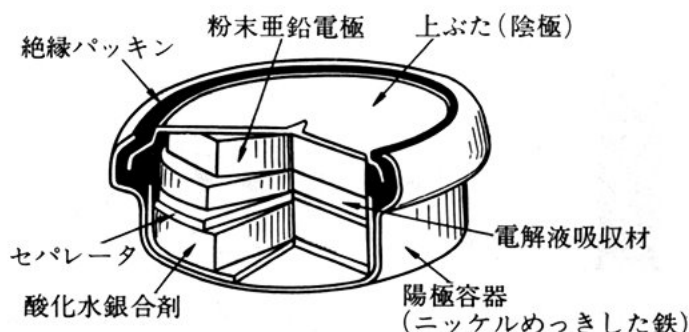
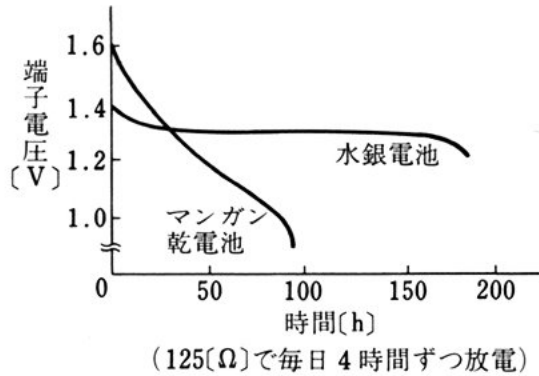
図 2　水銀電池（偏平形）

どう変わるかを示したもので，この図から，水銀電池の端子電圧がマンガン乾電池に比べて安定であることがわかる。

図 3 水銀電池とマンガン乾電池の放電特性

水銀電池の特徴は，電圧変動がきわめて少ないこと，小形で電流容量が大きいこと，長期間保存に耐えることなどである。

問 4. 水銀電池は，どんなところに使われているか。

(4) アルカリ蓄電池

アルカリ蓄電池 とは，電解液にかせいカリ溶液などのアルカリ溶液を使う二次電池のことで，正極活物質には塩基性ニッケル (NiO(OH))，負極活物質には鉄・カドミウムが多く使われる。カドミウムを使ったものを **ニッケル－カドミウム蓄電池** という。このほか，正極活物質に酸化銀を使った酸化銀－亜鉛蓄電池，酸化銀－カドミウム蓄電池などがある。

ニッケル－カドミウム蓄電池は，アルカリ蓄電池の代表的なものである。電解液が電池の反応にあずからないので，充放電に伴う濃度変化がほとんどない。また，重負荷に耐え，放電曲線が平らで，寿命が長く，保守が簡単であり，堅ろうであるなどの特長がある。欠点としては，電圧が1.3～1.4〔V〕と低く，高価なことである。

ニッケル－カドミウム蓄電池は，充電末期にガスの発生があるが，これを化学的に処理する技術が開発され，密閉形蓄電池が実用化さ

れるようになった。現在，乾電池に代わり，充電式の電気製品の電源として広く使われている。

問 5. アルカリ蓄電池は保守が簡単である。その理由は何か。

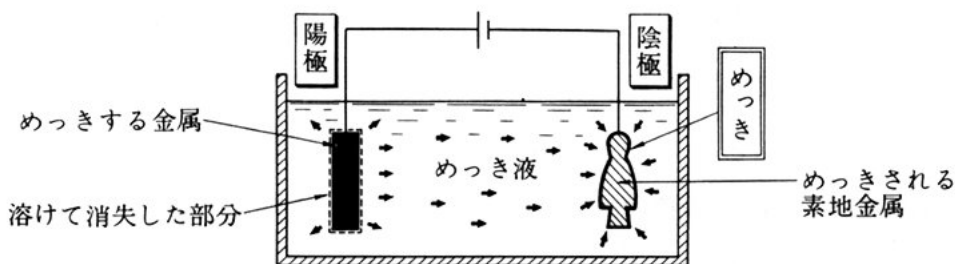
問 6. アルカリ蓄電池と鉛蓄電池を比較して，相違点を述べよ。

2. 電 気 め っ き

(1) めっきの概要

金属製の器具や装置の部品の表面に，他種の金属の薄層をつけることを**めっき**という。めっきは，かつて装飾を目的として行われたが，最近は金属材料に耐食性や耐摩耗性を与える，いわゆる工業用めっきが多くなってきた。

めっきの方法には，図4のように，電気分解により陰極表面に金属を付着させる**電気めっき**，金属を真空中で蒸着させる真空めっき，化学反応による化学めっき，ブリキやトタンなどのように融解した金属中に浸して付着させる方法，融解した金属を吹き付けて付着させる方法などがある。

図 4 電気めっきの原理

めっきの図は厚みが誇張してあるが，図のような厚めっきはとくに**電鋳**という。

（2） 電気めっきの種類

電気めっきに使われる金属には，銅・ニッケル・クロム・亜鉛・カドミウム・すず・金・銀などがある。中でも銅・金・銀は，均一な厚さのめっき層を作る性質が大きく，良好なめっきが得やすい。

5 表3に，電気めっきの条件とめっき液を示す。

酸性めっき液による**銅めっき**は，鉄素地にニッケル・銅・ニッケルの順にめっきするときなどの中間めっきとして使われる。また，アルカリ性めっき液による銅めっきは，鉄素地および亜鉛ダイカストに銅・ニッケル・クロムの順にめっきするときの下地めっきなど

10 に使われる。

ニッケルめっきは，鉄，銅合金および亜鉛ダイカストの防食・装飾などに広く使われる。また，クロムの密着性をよくするための中間めっきとして使われ，銅・ニッケル・クロムの順にめっきされる。

クロムめっきは，良好な光沢と防食性があるので，装飾用として

表 3　電気めっきの条件とめっき液

種　類	温度〔°C〕	電流密度〔A/dm²〕	めっき液〔g/l〕
金	60〜70	0.1〜0.5	金2，シアン化カリウム15，りん酸ナトリウム4〜8
銀	20〜30	0.3〜1.5	シアン化銀36，シアン化カリウム60，炭酸カリウム45
銅（アルカリ性）	50〜65	1.0〜2.0	シアン化銅60〜80，シアン化ナトリウム70〜90，遊離シアン化ナトリウム5〜10，水酸化カリウム20
銅（酸性）	20〜30	0.5〜1.5	硫酸銅200，硫酸50
ニッケル	20〜35	0.5〜1.0	硫酸ニッケル150，塩化アンモニウム15，ほう酸15
クロム	45〜55	10〜60	クロム酸250，硫酸2.5
亜鉛（アルカリ性）	25〜30	1〜5	シアン化亜鉛60，シアン化ナトリウム40，水酸化ナトリウム80，亜鉛33

（電気化学協会編「電気化学便覧」による）

利用される。工業用としては硬質クロムめっきがある。これは，5～300〔μm〕の厚さにめっきされ，耐摩耗性を与えたり，補修の目的のために使われる。

問 7. 電気めっきをする目的は何か。

3. 電解化学工業

(1) 水の電気分解

水を電気分解すると，純粋な水素と酸素が得られる。水素は，化学工業における重要な基礎原料である。酸素は，酸素製鋼に用いられ，また酸素アセチレン炎・酸水素炎として，鉄板の切断や溶接に用いられる。純粋な水は，導電率が非常に低く，電流がほとんど流れないため，水の電気分解には，水にかせいソーダを加え，導電率を上げて行う。かせいソーダの濃度は，15～20〔%〕である。図5は，水の電気分解の装置である。陰極と陽極の間には，発生した水素と酸素が混じらないように，石綿の隔板を入れる。純度99.5～99.8〔%〕の水素と99.0～99.5〔%〕の酸素が，95〔%〕以上の電流効率で得られる。

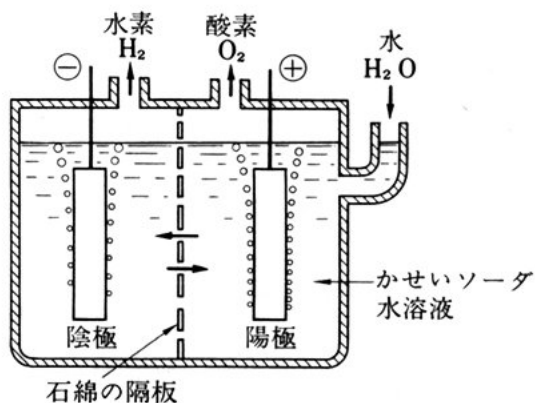



図 5　水の電気分解

(2) 食塩水の電気分解

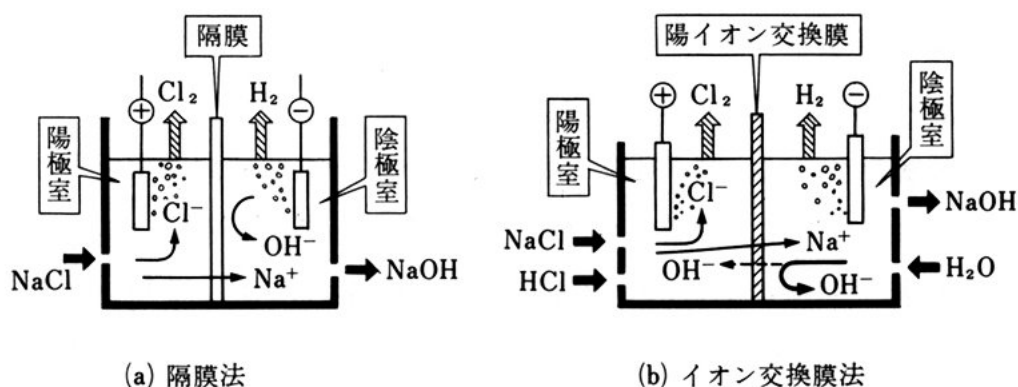
食塩水を電気分解すると，かせいソーダ・塩素・水素が得られる。かせいソーダは，化学繊維・染料・せっけんの製造や石油の精製などに，塩素は，塩酸・塩化ビニルの製造などに用いられている。

食塩は，水溶液中では Na^+ と Cl^- とに電離しており，水もわずかながら H^+ と OH^- とに電離している。食塩水に直流電流を流すと，陽極では Cl^- が放電して塩素ガスとなる。陰極には Na^+ と H^+ が集まるが，H^+ の方が放電しやすいので，陰極の電子をもらい水素ガスとなる。Na^+ は OH^- と反応して，かせいソーダができる。

かせいソーダの製造は，陰極電極として水銀を使った**水銀法**が採用されていたが，水銀の流出による公害問題をきっかけに，隔膜法への転換がなされることになった。しかし，隔膜法では，製品に NaCl が混入することなどから，これらの欠点を補うイオン交換膜法が研究され，その製法転換が計画されている。

隔膜法　図6(a)のように，陽極と陰極との間に，多孔質（石綿）の隔膜を使うことによって，H_2 と Cl_2 のガスが混合しないようにしている。しかし，隔膜では，拡散する OH^- を防ぐことができない

図 6　食塩水の電気分解

(a) 隔膜法　　(b) イオン交換膜法

ので，陽極室から陰極室へ塩水を流し，陽極室に OH^- が入らないようにしている。

イオン交換膜法　図(b)の陽イオン交換膜は，Na^+ は通すが，他のイオンは通さない。陰極室でできた OH^- の一部は，陽極室へ拡散するが，これを HCl で中和するようにしている。この陽イオン交換膜のため，陰極室には不純物が入らず，純粋なかせいソーダができる。

問 8.　食塩水を電気分解すると，何が得られるか。

(3) 融解塩電解

水素よりもイオン化傾向の大きな，ナトリウム・マグネシウム・アルミニウム・カルシウムなどの金属は，そのイオンを含む電解液を電気分解しても，先に水素が陰極に析出してしまうため，その金属を取り出すことができない。このようなときは，これらの金属塩または酸化物を熱して融解すると，電離が行われて導電性となるので，電気分解によって直接取り出すことができる。これを**融解塩電解**といい，アルミニウム・マグネシウムなどの製造に用いられる。

アルミニウムの製造　アルミナ (Al_2O_3) を 60〔%〕程度含むボーキサイトをかせいソーダで溶かし，高温で熱して純粋なアルミナとし，これに氷晶石 ($3NaF \cdot AlF_3$) を加えて融点を下げ，1000〔°C〕くらいに融解した状態で電気分解する。

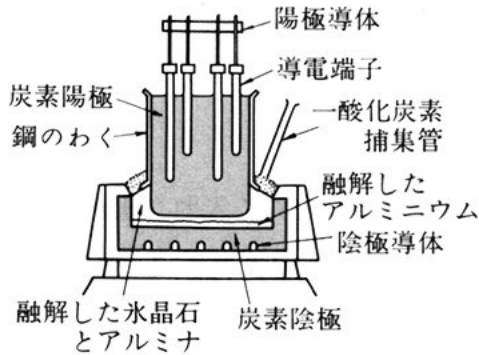
電解そうには，図7のようなゼーダーベルグ電解炉が用いられる。アルミニウムは，融解した状態で底にたまっているので，これを取り出す。陽極に生じた酸素は，陽極の炭素と化合して CO や CO_2 となり，陽極を消耗するので，陽極の炭素は，つねに炉の下方に送るようにする。

鋼のわくに，上からペースト状の炭素を入れ，陽極とする。炭素は，陽極に発生した酸素と化合して消耗するので，つねに連続的に供給する。陽極の炭素は，下降とともに焼成される。

図 7　ゼーダーベルグ電解炉

図7のような電極を**ゼーダーベルグ電極**といい，空気によって陽極を燃焼させることがなく，機械的にも強く，経済的である。

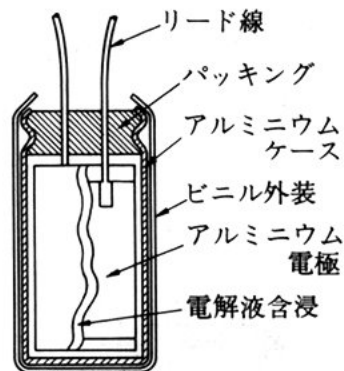
アルミナの電気分解に要する電力量は，アルミニウム1〔t〕当たり，18000〔kW·h〕程度で，消費電力量が多い。

5　**問 9.** アルミニウムが，電気のかん詰めといわれる理由は何か。

（4） アルミニウムの陽極現象

アルミニウムなどの金属を陽極として，適当な電解液中で電気分

図 8　電解コンデンサ

(a) ブロック形電解コンデンサ

(b) チューブラ形電解コンデンサの断面

解を行うと，その表面に酸化物の絶縁被膜が生ずる。このような現象を**陽極現象**という。工業的に陽極現象が最も広く利用されているのは，アルミニウムの表面酸化である。アルミニウムの表面酸化後，適当に加工すると，アルマイトができる。

アルミニウム板を，ほう酸やほう砂の水溶液中に入れて陽極とすると，その表面に非常に薄い良質な絶縁被膜ができる。そのため，電解液を陰極とすると，大きな静電容量をもったコンデンサが得られる。これを**電解コンデンサ**（electrolytic condenser）という。

問 10． 電解コンデンサの陽極には，どのような金属が用いられるか。また，電解コンデンサは直流専用であるが，その理由を考えよ。

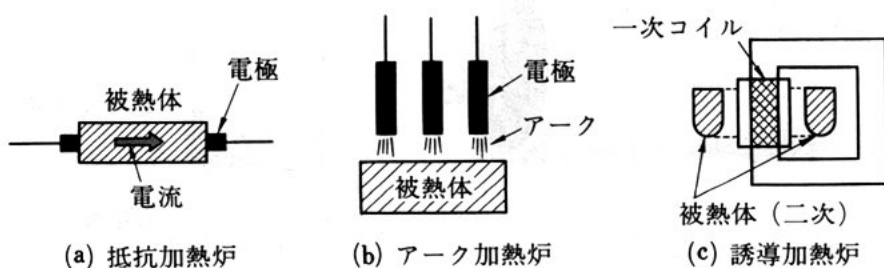
4．電熱化学工業

（1）電熱化学工業

肥料として用いられる石灰窒素，電気抵抗体として用いられるカーボランダムなどは，高温での化学反応によって製造される。このような場合の熱源として，電力が用いられる。電力は，石油・石炭などの燃料に比べて，価格が高いが，次のような利点をもっている。

1）炭素電極の昇華温度（3500〔°C〕程度）のような高温度まで，温度を高めることができ，しかも高い熱効率を維持しやすい。

図 9　電熱化学工業に用いられる電気炉

(a) 抵抗加熱炉　(b) アーク加熱炉　(c) 誘導加熱炉

2)　加熱に燃料を用いないので，製品に不純物が混じらない。

3)　温度調節が正確で速い。

4)　目的に応じて各種の電気炉がある（図9)。

このように，電熱を用いて化学反応を促進し，製品を造る工業を **電熱化学工業** という。

問 11.　電熱化学工業には，どのような欠点があるか。

（2） 炭化カルシウムの製造

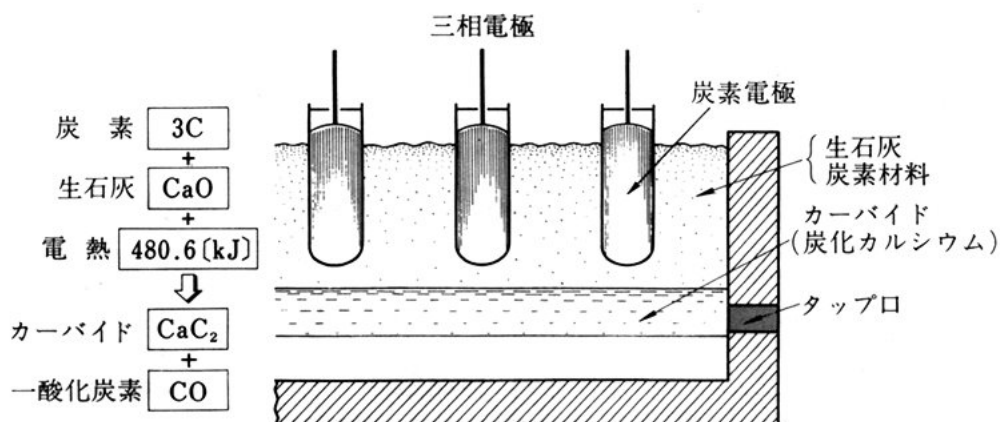
炭化カルシウム（CaC_2）は，カーバイドともよばれ，アセチレン（C_2H_2）や石灰窒素（$CaCN_2+C$）の原料となる。

炭化カルシウムの製造は，生石灰（CaO）を5～50〔mm〕の粒径にふるい分け，これにコークス・無煙炭などの炭素材（粒径5～20〔mm〕）を加えて，図10のようなカーバイド炉とよばれる三相直接加熱抵抗炉に入れ，2000～2300〔°C〕に熱して融解する。

電気炉では，次の反応によって，炭化カルシウムを生ずる。

$$CaO + 3C \longrightarrow CaC_2 + CO\uparrow - 480.6\,〔kJ〕$$ （吸熱反応）

できた炭化カルシウムは，炉の底にたまるので，一定時間ごとに

図 10　カーバイド炉

流出させ，冷却・粉砕する。

電気炉の炭素電極は，自焼式のものが多い。上部から供給されたペースト状の炭素は，炭素電極の消耗に伴って下方に下がり，焼成されて新しい炭素電極となる。消費電力量は，炭化カルシウム 1〔t〕当たり 3000〔kW·h〕程度である。

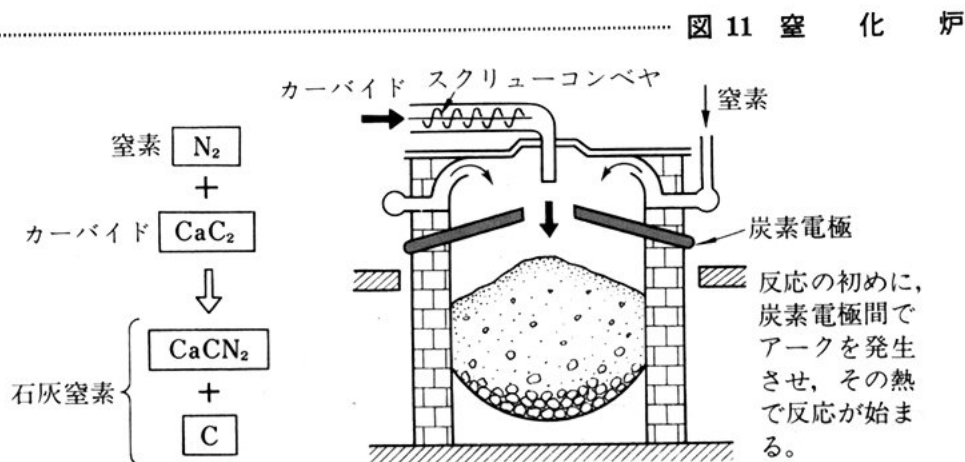
問 12. カーバイド（CaC_2）が水（H_2O）と反応すると，何を生ずるか。

（3） 石灰窒素の製造

炭化カルシウムを高温で窒素と反応させると，石灰窒素を生ずる。粉末または粒状のカーバイドに，950～1200〔°C〕で窒素を反応させると，次の反応式に示すように，$CaCN_2$（カルシウムシアナミド）と黒鉛微粉との混合したものが得られる。これを石灰窒素とよんでいる。

$$CaC_2 + N_2 \longrightarrow CaCN_2 + C\ (\text{黒鉛}) + 312.3\ [\text{kJ}]\ (\text{発熱反応})$$

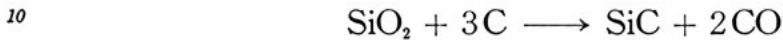
この反応は発熱反応で，950～1200〔°C〕での反応熱は 312.3〔kJ/mol〕である。いちど反応が始まると，この反応熱のために，外部から加熱しないでも，反応温度を保つことができる。図 11 は，この反応に用いる窒化炉の例である。

図 11 窒 化 炉

窒化炉の熱源として，反応熱が利用できるが，多少電熱を用いる炉もある。この場合の消費電力量は，石灰窒素 1〔t〕当たり 200〔kW·h〕程度であるが，窒素製造に必要な電力を加えても，石灰窒素 1〔t〕当たり 440〔kW·h〕程度で，消費電力量は少ない。

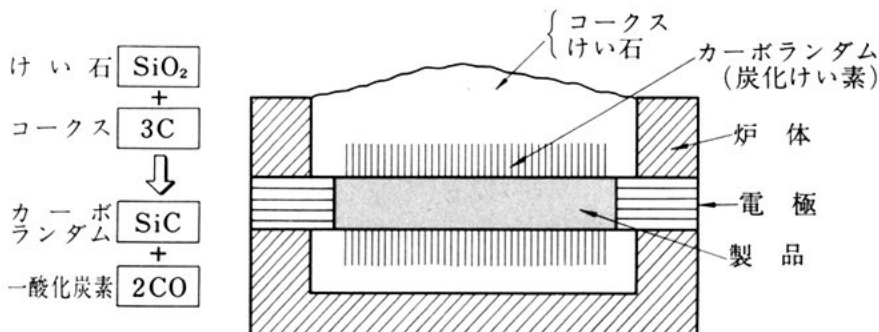
5　**問 13.** 石灰窒素の用途を調べてみよ。

（4） カーボランダムの製造

図 12 のような炭素電極をもつ抵抗炉に，けい石（SiO_2）とコークス（C）の混合物を炭素電極のまわりに詰め，1800～1900〔°C〕に熱すると，次の反応によってカーボランダム（SiC）が生ずる。

10
$$SiO_2 + 3C \longrightarrow SiC + 2CO$$

電流は，初め炭素電極を流れ，これが発熱体となる。温度が上がるに従って，電流は原料の中を流れるようになり，抵抗を直接加熱するようになる。消費電力量は，カーボランダム 1〔t〕当たり 7500～15000〔kW·h〕である。

15　カーボランダムは，非常に硬いので研摩材に適し，また，高温に耐えられるため，非金属の発熱体や耐熱材の原料となる。

図 12　カーボランダム炉

問　題

1. 図13は，水の電解そうの一つで，単極式水電解そうとよばれている。この電解そうで水を電気分解するとすれば，図の㋐，㋑，㋒を出入りする物質は，それぞれ何か。分子式で示せ。

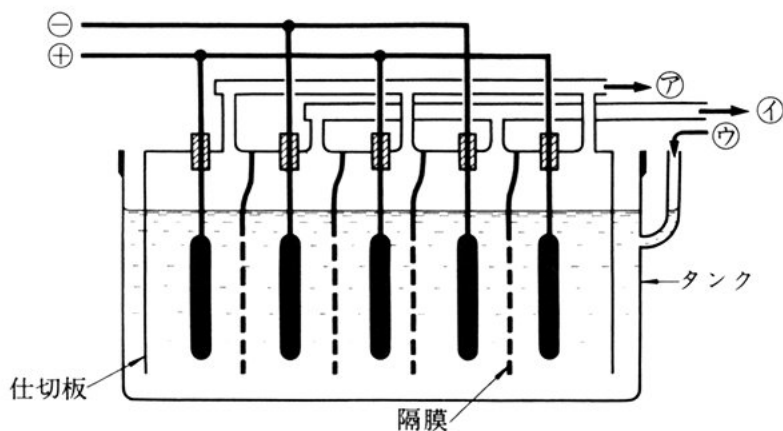



図 13

2. 燃料電池の活物質とは，どのようなものか。

3. 水銀電池の特徴を挙げよ。

4. 電解コンデンサの構造について説明せよ。

5. 電熱化学工業において，電力を熱源としたときの利点は何か。

6. カーバイドとは何か。また，これは何の原料になるか。

7. 石灰窒素の製造法について説明せよ。

各種の応用

この節のねらい　これまでに，電気応用の主な分野について学んだ。しかし，電気応用には，このほかにもいろいろな応用があり，それぞれ工業に，また日常生活に大きな役割を果たしている。ここでは，超音波とその応用，高電圧による静電現象とその応用，電気溶接などについて学ぶ。

1. 超　音　波

超音波とは，人間の耳に感じることのできない，およそ20〔kHz〕以上の高い振動数をもつ音波のことである。最近の超音波は，数百〔GHz〕($G=10^9$) の高い周波数のものや，数〔kW/cm²〕に達する高出力のものも得られている。

超音波の応用には，**情報的応用**と**エネルギー的応用**とがある。例えば，魚群探知機・超音波探傷器，身体の断層写真が撮れる超音波診断装置などは情報的応用の例であり，超音波洗浄器・超音波加工機・超音波集じん機などはエネルギー的応用の例である。

(1) 超音波の性質

超音波は，気体・液体・固体などすべての物質の中を伝搬する。表1に0〔°C〕，1〔atm〕における物質中を伝わる音波の速さを示す。

物質中の音波の速さをu〔m/s〕，周波数をf〔Hz〕とすると，その波長λ〔m〕は，

$$\lambda=\frac{u}{f} \qquad (1)$$

表 1 物質中の音速 (単位〔m/s〕)

気体	音速	液体	音速	固体	音速
空気	331.45	水	1500	鉄	5950
二酸化炭素	258	海水	1513	銅	5010
ヘリウム	970	ベンゼン	1295	亜鉛	4210
塩素	205.3	水銀	1450	水晶	5720
水素	1269.5	エチルアルコール	1207	ポリスチレン	2350

(「理科年表 (昭和64年版)」による)

で与えられる。

超音波は，周波数が高いので，可聴音に比べて波長は短い。波長が短いことから，超音波は指向性が強くなり，鋭いビームになるので，より鮮明な影を作る。つまり，超音波探傷器なら分解能の高い画像が得られる。また，超音波ビームは，小さな場所に集束でき，これによって著しい局部加熱を行うことができる。

次に，超音波が強力な場合，これを液体中に放射したとき，液体中にあわが発生する。この現象を**キャビテーション** (cavitation) という。この現象によって，発光や化学作用が起こり，また混ざり合わない液体を乳剤化する作用などがある。

(2) 超音波の発生

超音波を発生させるには，図1のように，フェライト，ニッケルなどの磁気ひずみ現象を利用する磁気ひずみ振動子，チタン酸バリウム磁器などの電気ひずみ振動子，水晶の圧電現象を利用する圧電振動子などが使われる。これらは，発振器によって駆動され，高周波電力を超音波動力に変換するもので，電気振動を機械振動に変える素子であるから，**電気－機械変換器**とよばれる。また，これらの素子は，可逆性があるので，超音波の受信・検出にも使われる。

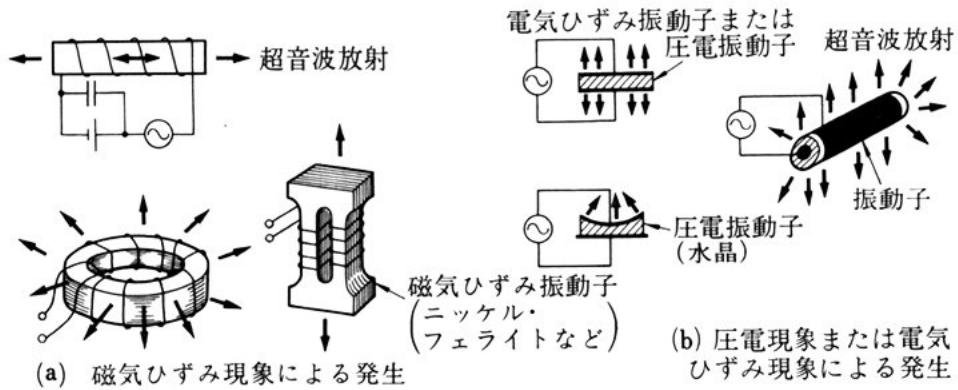



図1 超音波の発生

(3) 超音波の応用

超音波洗浄　図2(a)のような装置を用いて，キャビテーションによる効果とか，物理的および化学的な反応促進作用などにより，洗浄効果を向上させることができる。これを**超音波洗浄**という。超音波洗浄は，眼鏡(めがね)わく・レンズ・時計部品・電子部品・機械部品など，いろいろな分野で利用されている。

超音波加工　図2(b)のような装置を用いて，と粒をなかだちとして，超音波振動をしている工具が，被加工物に衝撃を与え，微細に砕きながら加工する。これを**超音波加工**という。超音波加工は，硬い金属，もろい金属，非金属などの穴あけ・切断・彫刻・表面仕上げなどの加工に利用される。

超音波はんだづけ　図2(c)のような超音波はんだごては，その先端の超音波振動によって，金属表面の酸化物被膜が取り除かれ，ペーストまたは溶剤を用いないでも，はんだづけを行うことができる。これを**超音波はんだづけ**という。超音波はんだづけは，アルミニウムのはんだづけもできるので，アルミニウムはくコンデンサの端子のはんだづけなどに用いられる。

超音波溶接　図2(d)のような装置を用いて，金属板または熱可

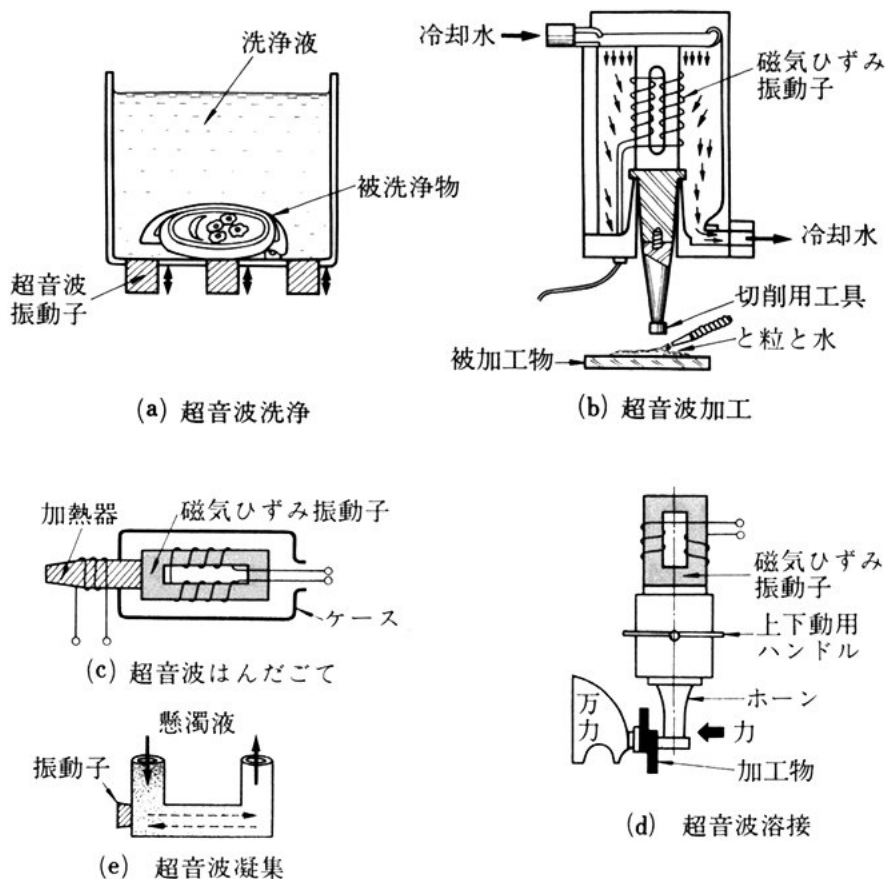



図2　超音波の応用

塑性プラスチックを重ねておいて，圧力を与えた後に，超音波振動を加えることにより，熱を加えなくても溶接することができる。これを**超音波溶接**という。超音波溶接は，カセット製造，オープンリールの組み立て，電気部品のカバーの取り付け，非鉄金属の溶接などに利用される。

超音波凝集　図2(e)のような装置により，容易に沈殿しない懸濁微粒子をもった液体に，強力な超音波振動を加えると，懸濁微粒子は互いに衝突しながら成長し，粗大な粒子に凝集する。これを**超音波凝集**という。超音波凝集は，洗炭のさいに，水中にある微粉炭の回収などに利用される。

問 1． 超音波特有の性質には，どのようなものがあるか。

問 2． 磁気ひずみ振動子・電気ひずみ振動子・圧電振動子とは，どんな物質か調べてみよ。

問 3． 周波数 300〔kHz〕の超音波の，空気中における波長は何メートルか。

問 4． 宝石の加工に超音波が使われている。これについて調べてみよ。

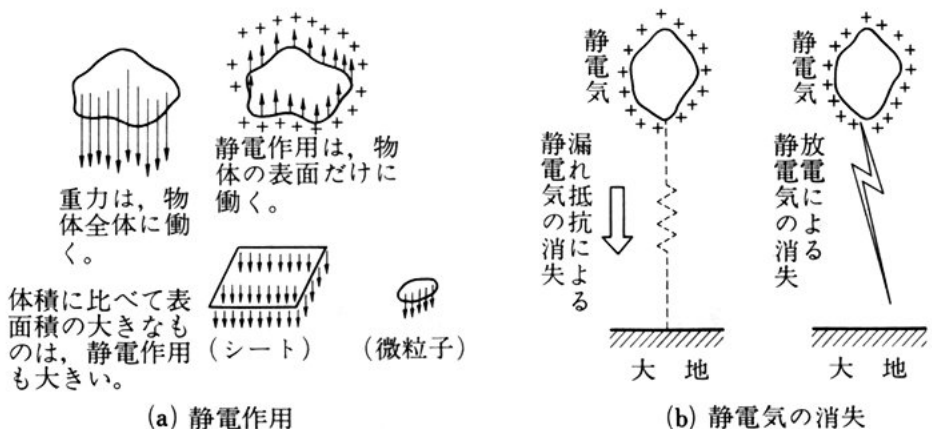
2．電 気 集 じ ん

（1） 微粒子と静電気

静電気は，固体と固体，または固体と液体を接触させると，つねに発生するもので，その結果，一方は正に帯電し，他方は負に帯電する。このように，物体どうしの接触などによる帯電のほかに，人工的に，あるいは接触によらずに帯電させることもできる。

物体の表面に生じた静電気が示す現象のうち，とくに重要なのは，外部から加えた電界による吸引・反発現象と，電荷の量が増えた場合の放電現象との二つである。図 3 (a) に示すように，静電作用は，

図 3　微粒子と静電気

(a) 静電作用　　(b) 静電気の消失

微粒子などではとくに著しく現れる。

静電気が，いろいろなところで生じているにもかかわらず，われわれは，日常生活ではほとんど静電現象を見ることがない。それは，図3(b)のように，物体の表面から静電気が逃げるためである。そこで，静電気の量が多く，物体の漏れ抵抗が大きく，放電が起こりにくい状態であれば，静電現象が生じやすい。

問 5. 物体に帯電する静電気量を増やすには，どのようにしたらよいか。

（2） 電気集じん器の原理

図4のように，接地した金属円筒の中心に，細い針金を絶縁して張り，これに負の直流高圧を加える。下方から，円筒の中へ微粒子を含んだガスが入ると，微粒子は，コロナ放電によって負に帯電される。これは，正電位の円筒に，静電力によって引き付けられ，ちりとして円筒の内側に付着する。円筒をたたくと，円筒に積もった微粒子層は，はく離して受け箱に落ちる。外側の円筒電極を**集じん電極**，内側の針金電極を**放電電極**という。実際の装置では，集じん電極は，平行な平板である。

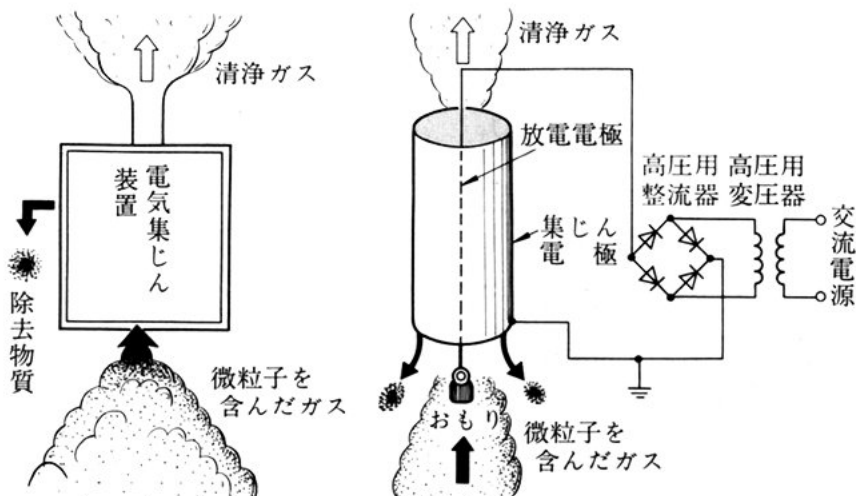
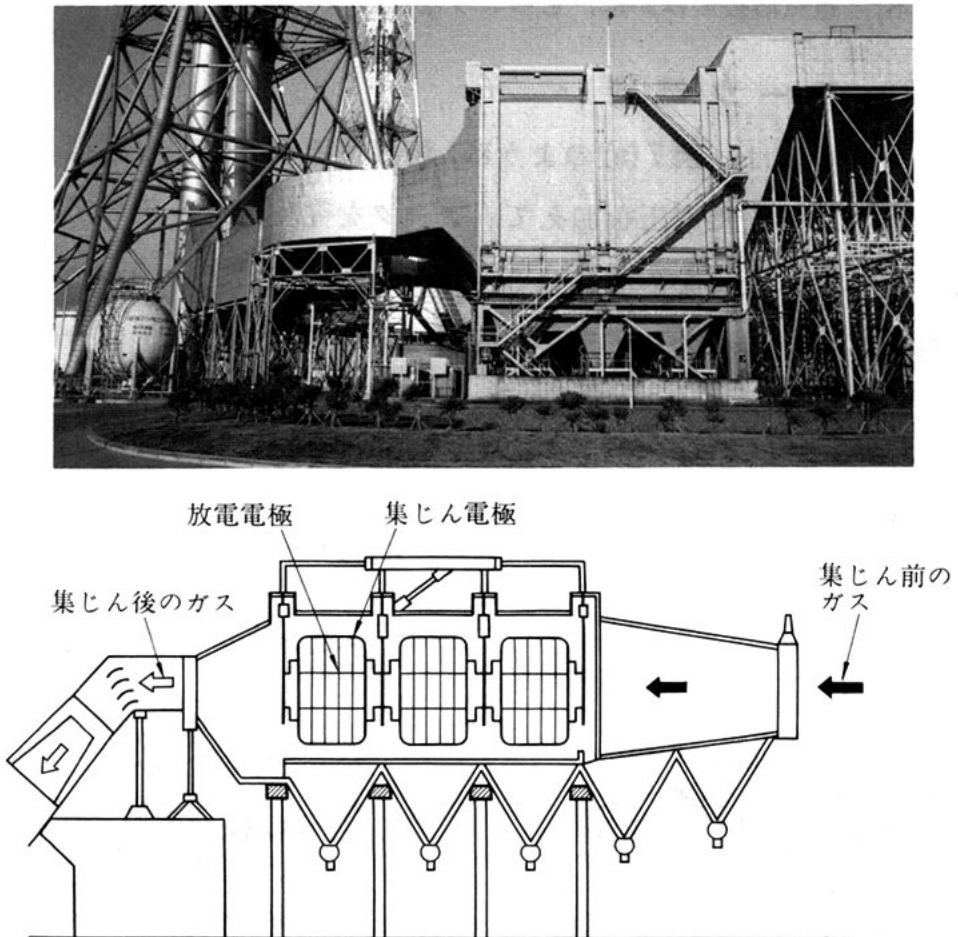
図 4　電気集じん器の原理

（3） 電気集じん装置の構造

図5は，乾式電気集じん装置の外観と構造である。電源は，高圧用変圧器で電圧を上げ，シリコン整流器によって整流する。ふつう，集じん電極には，40～50〔kV〕の負の高圧を加える。この場合，火花放電が生じても，電流が増加すると電圧が著しく下がるような特性（**垂下特性**，図7(b)参照）を電源にもたせて，アークが持続するのを防いでいる。

問 6. 静電気による静電現象の例を挙げよ。

問 7. 電気集じん器の集じん電極は，なぜ正極にして接地するのか。

図 5 電気集じん装置

3. 電 気 溶 接

(1) 電 気 溶 接

図6のように，ボルト・ナット・リベットなどで金属を接合する代わりに，電気によって接合部を加熱して溶融し，溶接することを**電気溶接**という。電気溶接には，加熱・溶融をアーク熱で行う**アーク溶接**と，抵抗熱で行う**抵抗溶接**とがある。

抵抗溶接は，溶接部に機械的圧力を加えるが，アーク溶接は，ふつう溶接棒を用いて，母材を溶着するので，圧力は加えない。また，いずれの溶接法でも，溶接電源には，直流または交流が用いられる。

問 8. 電気溶接のほかに，どのような溶接法があるか調べてみよ。

(2) ア ー ク 溶 接

アーク溶接は，図7(a)のように，溶接する金属材料と電極との間に，溶接に適した電圧を加えて，アークを発生させ，そのアーク熱を利用して，金属を溶着させるものである。

溶接棒は，電極として母材と同質のものを用い，溶接部分に溶接

図6 金属の接合

(a) ボルト・ナットによる接合

(b) アーク溶接による接合

(c) 抵抗溶接による接合

(a) アーク溶接のようす

(b) 垂下特性

i) 可動鉄心形　ii) 可動コイル形

(c) アーク溶接用変圧器

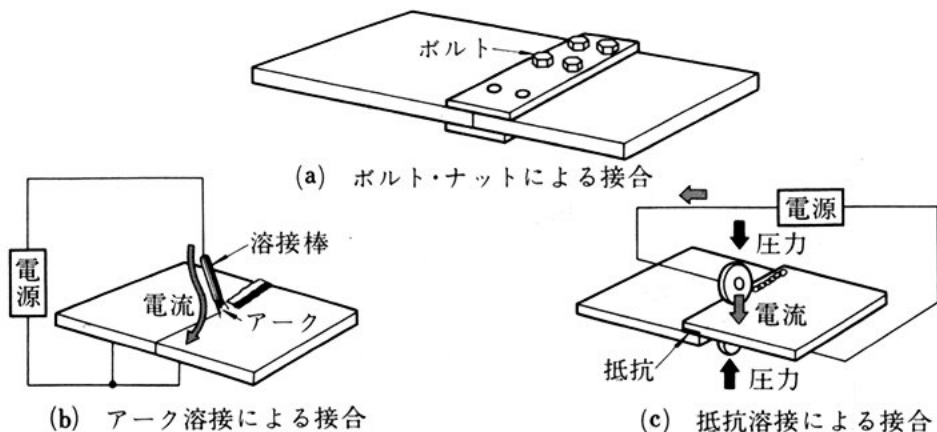
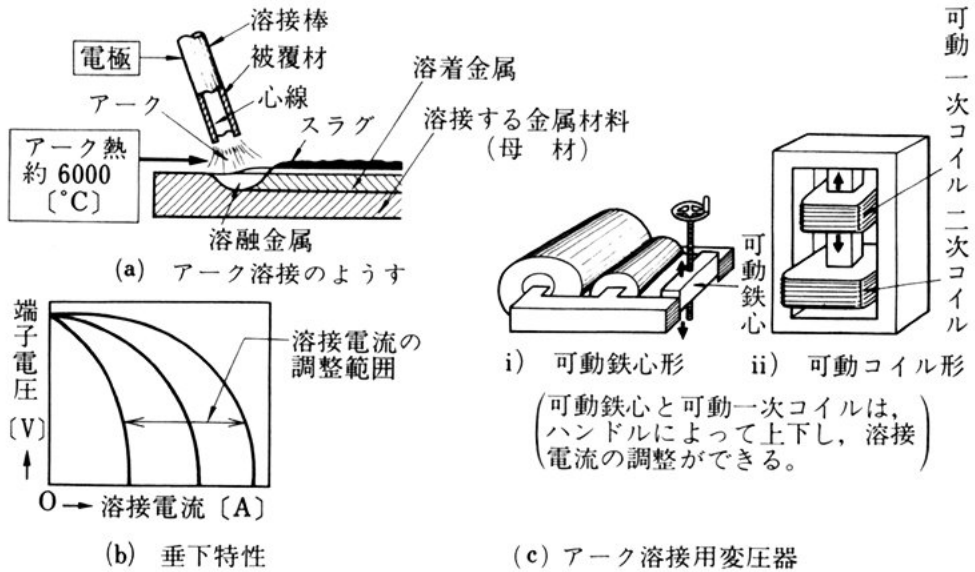



図 7 アーク溶接

棒が融解して溶着する。空気中での溶着は，高温で酸化・窒化しやすいので，これを防ぐため，溶接棒を被覆材で包む。また，被覆材は，溶接時に高温で溶剤がとけ，アーク部分をガスで包み，空気をしゃ断するので，安定な溶接をすることができる。

アーク溶接の電源は，直流と交流とがあるが，図 7(b)のような垂下特性をもたせてアークを安定させる必要がある。

とくに交流アークは，直流アークと違って，1サイクルの間に2回電流が0になる。その瞬間，アークは一度消え，反対向きに再び生ずるため，安定度がわるい。そこで，アークの発生しない無負荷時に，溶接機の端子電圧を高めておき，アークの発生で端子電圧を低下させる装置が必要である。

また，1台の溶接機で，薄板や厚板を溶接するため，溶接電流を広い範囲に調整できることが必要である。このため，図(c)のような，漏れリアクタンスの大きい変圧器を用いる。

問 9. アークとはどのような現象か。

(3) 抵 抗 溶 接

抵抗溶接は，接合しようとする金属面を重ね，接触面を通して大電流を流すと，接触抵抗によるジュール熱で，接触部が半溶融状態になる。この部分に機械的圧力を加えた状態で溶接する。

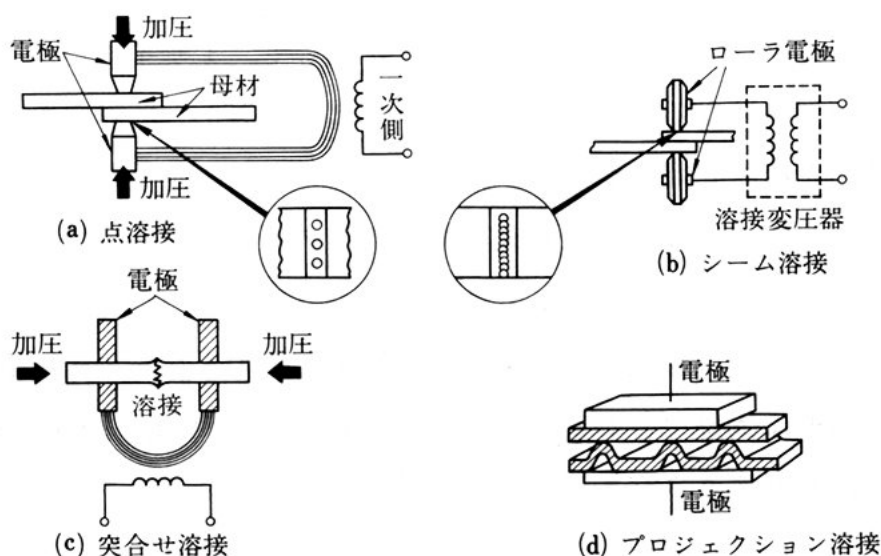
点溶接　図8(a)のように，電極間のせまい部分に，電流が集中するようになっている。リベットと同様に，板の重ね接着に用いられることが多く，抵抗溶接では最も広く用いられる。

シーム溶接　図(b)のように，点溶接を連続的に行うため，電極をローラ形にした溶接である。金属板や電極の過熱を避けるため，断続電流を用いることが多い。

突合せ溶接　図(c)のように，丸棒・角棒などの断面を突き合わせ，これに電流を流して加熱し，適当な溶接温度になったとき，強い圧力を加え，溶接する。

問 10.　抵抗溶接の一つに，図8(d)の**プロジェクション溶接**とよばれるものがある。他の抵抗溶接と似ている点および利点を図から考えよ。

図8 抵 抗 溶 接

(a) 点溶接　(b) シーム溶接　(c) 突合せ溶接　(d) プロジェクション溶接

問 11. 抵抗溶接が，アーク溶接より優れている点は何か。

問 12. 電気溶接に用いられる溶接棒は，どんな材質でできているか。

問　　題

1. キャビテーションとはどんなことか。

2. 超音波はんだごては，どんなものをはんだづけするのに便利か。

3. 超音波を利用して，海の深さを測定する方法を考えよ。

4. 図9は，噴霧式塗装装置である。この装置による塗装の原理を図から考えてみよ。これは，電気のどんな働きを応用したものか。

5. 図10は，アーク溶接に用いられる他励差動複巻発電機の原理図である。F, A_f, SF は，それぞれ何を表すか。

6. 電子ビーム加工，電子ビーム溶接について調べよ。

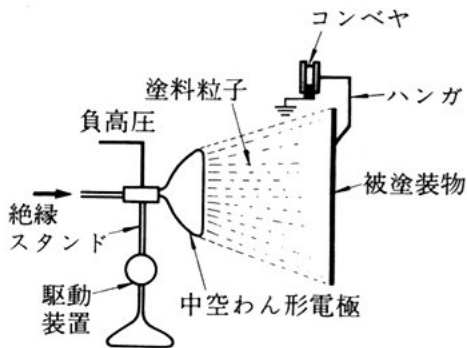
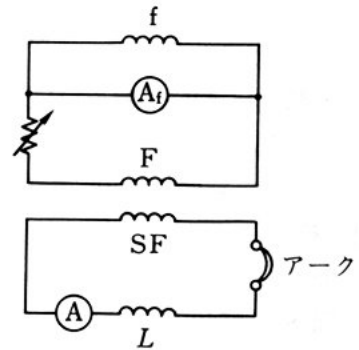



図 9　　図 10

問　題　解　答

第6章　電　子　計　測

1　節

問 3.　1060 [MΩ]，10.6 [MΩ]，10.6 [kΩ]，1.06 [kΩ]

問 4.　919 [kHz]　　**問 6.**　56.3 [MHz]　　**問 9.**　2 [mW]　　**問 10.** 3.6×10^{-5} [W]　　**問 12.**　1.81 [mH]　　**問 13.**　6.67 [pF]　　**問 14.**　6000 [km]

問 15.　300 [MHz]　　**問 16.**　252 [kHz]　　**問 17.**　15.2 [kHz]

問題 7.　101 [μH]，6.37 [Ω]

2　節

問 1.　$2^{10}=1024\fallingdotseq1000$ [個]

第7章　照　　明

1　節

問 1.　541 [THz]　　**問 2.**　380～780 [nm]　　**問 3.**　204 [lm/W]

問 4.　100 [cd]　　**問 6.**　1000 [lx]　　**問 9.**　25 [lx]

問 10.　$E_n=20$ [lx]，$E_h=8.94$ [lx]，$E_v=17.9$ [lx]　　**問 11.**　2.78 [lx]

問 12.　5.6 [lx]　　**問 13.**　(a)　15.9 [lm/m²]　　(b)　31.8 [lm/m²]

(c)　3.98 [lm/m²]　　(d)　7.96 [lm/m²]

問題 1.　545～508 [THz]　　**2.**　1500 [lx]　　**3.**　88.9 [lx]

4.　$E_h=E_n\cos\theta$，$E_v=E_n\sin\theta$，$E_n=\sqrt{E_h{}^2+E_v{}^2}$

5.　(1)　輝度　　(2)　光束発散度　　(3)　照度　　(4)　光度

2　節

問 5.　$F=1600$ [lm]，$\eta=16$ [lm/W]　　**問 7.**　113 [cd]

問 8.　3560 [lm]

問題 1.　(2)　タングステン線　　(3)　3380 [°C]　　(4)　2580 [°C]

3　節

問 2.　22 [%]　　**問 11.**　27～28 [lm/W]

問題 1.　(1)　0.556　　(2)　50 [lm/W]　　**2.**　(1)　2800 [lm]

(2)　70 [lm/W]

4　節

問 2.　$NF=4.76\times10^5$ [lm]，$N=238$ 本　　**問 4.**　482 [lx]

問 5.　36.8 [lx]　　**問 6.**　$E_n=26.3$ [lx]，$E_h=22.7$ [lx]，$E_v=13.1$ [lx]

問題 1.　(1)　2600 [lm]　　(2)　40 本　　(3)　104000 [lm]　　(4)　約 3

(5)　0.64　　(6)　46600 [lm]　　(7)　291 [lx]

2．P=2000 [W]，P'=12.5 [W/m^2]

3．U=0.64，N=120 本，60 個，X 方向へ 6 個，Y 方向へ 10 個

第8章　電　　熱

1　節

問 1．0.00116 [kW·h]　**問 2**．5.6696×10^{-12} [W/(cm^2·K^4)]

問 3．8000 [W]　**問 4**．58.1 [W/m^2]　**問 8**．15.7 [Ω]

問題 1．(4)　4.33 [min]　**2**．(2)　50 [kW·h]　180000 [kJ]

3．R=1.53 [Ω]，P=26.2 [kW]，Q=31400 [kJ]　**4**．5.82 [W/m^2]

2　節

問題 1．(2)　1.73　(4)　4.09×10^3 [kW]

5．I=44.9 [A]，P=6650 [kW]

第9章　電 気 応 用

1　節

問 4．20 [‰]

問題 6．直流電動機

2　節

問題 1．㋐　O_2　㋑　H_2　㋒　H_2O

3　節

問 3．0.00110 [m]

索　　引

あ

アークの特性 ………108
アーク溶接 ……168,169
アーク炉 ……………107
アジャックスワイヤット炉 ………………110
圧力センサ……………37
アルカリ蓄電池 ………… 145,146,149
アルカリマンガン電池 ……………… 145,146
アルミニウムの製造 …………………… 154

い

EL ランプ ……………79
イオン交換膜法 ……………… 153,154
位相測定 …………28,29
一次電池……… 145,146
位置平衡法……… 42,43
一般照明用電球………61
色温度 ……………57,58
インピーダンスボンド …………………… 132

え

エージング……………60
ATS 装置……………134
ATO装置……………136
ATC装置……………135
エルー炉 …………108
エレクトロルミネセンス……………………79
鉛直面照度 ………52,53
塩浴炉 ………………106

お

オシロスコープ………28
音声周波………………21
温度計の測定範囲 …101
温度センサ……………32
温度の測定 …………101
温度放射………………57

か

ガイガー－ミュラー計数管……………………39
界磁制御法 …………127
界磁チョッパ ………128
隔膜法 ………………153
架線方式 ……………122
活物質 ………………145
カテナリちょう架式 …………………… 122
カーバイド炉 ………157
カーボランダムの製造 …………………… 159
カーボランダム炉 …159
枯らし…………………60
間接式アーク炉…… 107
間接式抵抗炉 ………106
間接照明………………83
カンデラ………………49
カント ………………120
緩和曲線 ……………120

き

機械ブレーキ ………129
軌　間 ………………120
キセノンランプ………77
帰　線 …………28,27
帰線（電車線路の） ……………… 121,123
帰線消去 …………27,28
き電線 ………………121
き電方式 ……………121
輝　度 …………55,71
軌　道 ………119,120
軌道変圧器 …………134
キャビテーション …162
吸収形周波数計………22
吸収率…………………54
Qメータ………17,18,19
狭　軌 ………………120
共振誤差 ……………6,7
局部照明………………83
距離の逆2乗の法則…51
金属発熱体……………98

く

空気電池 ……………146
クリアパルス…………24
クリプトール炉 ……106
クロムめっき ………151

け

けい光水銀ランプ……73
けい光灯………67,68,69
けい光ランプ ………… 67,68,70,71
ケーブルカー ………138
建築化照明……………84

こ

高圧炉 ………………108
高圧ナトリウムランプ …………………………77
恒温そう………………32
広　軌 ………………120
高周波…………………21
高周波乾燥 ……114,115

高周波乾燥装置 ……115
高周波電流計 …………5
高周波焼入装置 ……111
高周波誘電加熱 ……114
高周波誘導炉 …110,111
高周波用電圧計の方式 ……………………… 8
光　色…………………71
光　束…………47,48,50
光束計…………………64
光束の測定……………64
光束発散度……………54
剛体ちょう架式 ……………… 122,123
光　度…………48,49,55
光度の測定 ………62,63
光度の標準……………49
こう配 ………………121
効率（光源の）………71
黒鉛化炉 ……………107
黒　体…………………57

さ

再始動時間……………75
サイリスタ制御法 …128
作業面…………………86
サーマルコンバータ方式……………………42
サーミスタ ………14,34
サーミスタ温度センサ ……………………33
サーメット …………100
酸化銀電池 ……145,146
三相帯 …………147,148
酸素－水素燃料電池 ……………… 146,147

し

GM計数管 ………39,40
シェーリングブリッジ ……………………16
視感度…………………47
磁気センサ……………38
C－C形電力計 …14,15
実効抵抗 ………………3
実効放射率……………96
室指数…………………87
湿度センサ ………36,37
CTC装置……………137
自動列車運転装置 …136
自動列車制御装置 ……………… 134,135
自動列車停止装置 …134
シーム溶接 …………170
集じん電極 …………166
集電靴 …………125,126
集電装置 ………125,126
周波数…………………21
蒸気圧（水銀ランプの） ……………………74
照　度…………………50
照度基準 …………84,85
照度の測定……………65
消費形電力計…………12
照明器具………81,82,84
照明方式 …………82,83
照明率 ……………87,88
商用周波………………21
食塩水の電気分解 …153
信　号 ………………131
新交通システム…… 140
真空融解炉 …………111
真空炉 ………………111
シンチレーション計数管……………………40

す

垂下特性 ………167,169
水銀電池…………… …… 145,146,148,149
水銀法 ………………153
水銀ランプ ………73,74
水平環溝式 …………110
水平面照度 ………52,53
スチルブ………………55
ステファン－ボルツマン定数………………96
ステラジアン…………49
スペクトル……………47
スラック ……………120

せ

制御回路………………32
正極活物質 ……145,146
赤外線乾燥 …………113
赤外線電球 …………114
ゼーダーベルグ電極 …………………… 155
絶縁継目板 …………132
石灰窒素の製造 ……158
接触式温度計 …101,102
セレン光電池…………65
センサ…………31,32,33
線条変圧器 …………134
全般拡散照明…………83
全般照明………………83
千分率 ………………121

そ

測温抵抗体センサ……32

た

第三レール ……121,123
耐熱材…………………99
耐熱性酸化物 ………100
耐熱電気絶縁材 ……100
耐熱保温材……………99
ダイノード……………40
太陽電池 ……………145
対　流…………………96
短アーク形……………78
炭化カルシウムの製造 …………………… 157

タングステン電球……60
タンマン炉 …………106

ち

窒化炉 ………………158
長アーク形……………78
超音波 ………………161
超音波加工 ……163,164
超音波凝集 …………164
超音波洗浄 ……163,164
超音波はんだづけ
……………… 163,164
超音波溶接 ……163,164
直接式アーク炉 ……108
直接式抵抗炉 ………107
直接照明方式…………82
直接ちょう架式 ……122
直送法…………………41
直並列制御法 ………127
ちらつき………………72

つ

通過形電力計…………14
突合せ溶接 …………170

て

抵抗加熱………………94
抵抗制御法 …………127
抵抗溶接 ………168,170
抵抗炉 ………………106
ディジタル周波数計…23
ディジタルマルチメータ……………………25
低周波誘導炉 …109,110
ディスクブレーキ …129
鉄クロム電熱線………98
電圧制御法 ……126,127
電位誤差 ………………7
電解コンデンサ
……………… 155,156
電気回路（電気車の）
…………………… 125
電気サイン……………78
電機子チョッパ ……128
電気車 ………………124
電気集じん器 ………166
電気集じん装置 ……167
電気めっき ……150,151
電気ブレーキ ………130
電気方式（電気鉄道の）
…………………… 119
電　球 …………59,60
電気溶接 ……………168
電気炉……………97,105
点光源 …………49,50
電子照明………………79
電磁直通空気ブレーキ
…………………… 129
電磁波のスペクトル…46
電車線路 ……………121
電　食 ………118,123
点制御式 ……………134
電　鋳 ………………150
伝　導…………………95
点灯回路 ………69,73
電熱化学工業 …156,157
電熱乾燥 ……………113
電熱材料………………97
点溶接 ………………170
電流計の特性 …………5
電力回生ブレーキ …130

と

透過率…………………54
投光器用電球…………61
銅めっき ……………151
道路の照明……………90
トリガ式オシロスコープ……………………26
トリガパルス ……26,27
トロリー線 …………121

な

長形光度計 ………62,63
ナトリウムランプ……76
鉛蓄電池 ………145,146

に

ニッケル－カドミウム蓄電池 ……………149
ニッケルクロム電熱線
………………………98
ニッケルめっき ……151
二次電子倍増管………40
二次電池 ………145,146

ね

ネオン管………………78
ネオンランプ ……78,79
熱抵抗…………………96
熱電対…………………33
熱電対温度センサ
………………… 32,33
熱電電流計 …………6,7
熱伝導率………………96
熱風乾燥 ……………113
熱容量…………………95
燃料電池 ………145,146

は

配　光…………………64
配光曲線 …………63,64
配光立体………………64
波形誤差………………11
波　長…………………21
発光ダイオード………79
発電ブレーキ ………130
発熱体 …………97,98
パーミル ……………121
バレッタ ………………14
ハロゲン電球 ……61,62
半間接照明……………83

反射形水銀ランプ……73
反射形投光電球………61
反射率…………………54
パンタグラフ …125,126
半直接照明……………83
半導体センサ…………32
半導体利用光源………79

ひ

P形電子電圧計
…………… 8,9,10,11
光高温計 ……………103
光センサ………………35
光の色…………………46
光のスペクトル………72
非金属発熱体 ……98,99
ピーク形電子電圧計…10
比視感度………………48
比視感度曲線…………48
比視感度特性…………48
ビューゲル…… 125,126
標準軌道 ……………120
標準電球………… 62,63
標準負荷法……………12
表皮効果 ……………2,3
表皮誤差 ………………6
漂遊インダクタンス …7
漂遊容量……………… 7
ピンチ効果 …………110

ふ

フェイルセイフ方式
…………………… 134
負極活物質…… 145,146
符号法…………… 43,44
浮上式鉄道 …………141
物質中の音速 ………162
プロジェクション溶接
…………………… 170
プローブ………………10
分布容量 ……2,4,19,20

へ

閉そく区間 …………131
閉そく信号機 …132,133
閉そく信号方式 ……131

ほ

放　射 ……………47,96
放射高温計 …………102
放射式温度計 ………101
放射線…………………39
放射線センサ…………39
放射線測定装置………39
放射束…………………47
法線照度………………52
放電電極 ……………166
保温材 ………………100
保守率 ……………87,88
ホトトランジスタ
………………… 34,35
ホール効果……………38
ホール素子……………38
ホール電圧……………38
ボロメータ電力計……13

ま

マンガン乾電池
………… 145,146,149

み

水の電気分解 ………152

め

めっき ………………150
めっき液 ……………151
面光源…………………54

も

モノレール …………139
漏れ変圧器……………75

ゆ

融解塩電解 …………154
誘導式表面加熱 ……112

よ

陽極現象（アルミニウムの）…………155,156
溶接棒 ………………168
予熱始動点灯回路……69

ら

ラッチ回路……………24
ラッチパルス…………24
ラピッドスタート点灯回路 ……………… 69

り

リサジュー図形 …28,29
力行特性曲線 ………126
立体角 ……………48,49
リニアモータ ………142
両側方式………………91

る

ルクス…………………50
ルーメン………………48
ルンマ－ブロジュン立方体…………………63

れ

列車集中制御装置 …137
レール ………………119
レールボンド ………123
連続制御式 …………134

ろ

ロープウェー ………138
ロングレール ………120

■別記著作者

山口昌一郎

緒方　興助

赤沼　岩男

石井　孝司

井上　正也

熊谷　文宏

清水　康敬

●表紙・扉AD
多川精一　＋　中野達彦
（東京エディトリアルセンター）

●表紙
飯田　敏行

電気技術II B

7	実教	工業　066

昭和57年3月31日　文部省検定済
昭和58年2月25日　初版発行
平成2年1月20日　印　刷
平成2年1月25日　発　行

©著作者――●
宮入　庄太　ほか7名(別記)

発行者――●
実教出版株式会社
代表者　奥脇　誠治
東京都千代田区五番町5

印刷者――●
中央印刷株式会社
代表者　日岐　弘登
東京都新宿区新小川町4－24

発行所――●
実教出版株式会社
〒102 東京都千代田区五番町5
電話　03－238－7700（代表）
振替　東京　4－183260

定　価――●
文部大臣が認可し官報で告示した定価
〔消費税に相当する金額を含む〕（上記の定価は，各教科書取次供給所に表示します）